

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TALITA CRISTINA SANTOS

QUIMIOESTRATIGRAFIA DAS ROCHAS CARBONÁTICAS DA FORMAÇÃO SETE
LAGOAS: GRUPO BAMBUÍ - ARCOS, MG.

CURITIBA

2012

TALITA CRISTINA SANTOS

QUIMIOESTRATIGRAFIA DAS ROCHAS CARBONÁTICAS DA FORMAÇÃO SETE
LAGOAS: GRUPO BAMBUÍ - ARCOS, MG.

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Geologia, no
Programa de Pós-Graduação em Geologia, Setor
de Ciências da Terra, Universidade Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. José Manoel dos Reis Neto

CURITIBA

2012

S237 Santos, Talita Cristina
Químioestratigrafia das rochas carbonáticas da formação Sete Lagoas: Grupo Bambuí - Arcos, MG. / Talita Cristina Santos. – Curitiba, 2012.
145 f. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia.
Orientador: José Manoel dos Reis Neto

1. Geologia estratigráfica. 2. Rochas carbonáticas. I. Reis Neto, José Manoel dos. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDD: 551.7

TERMO DE APROVAÇÃO

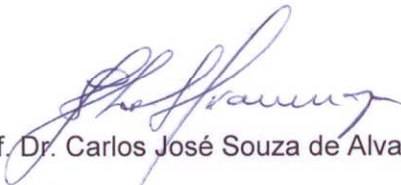
TALITA CRISTINA SANTOS

*"Químioestratigrafia das Rochas Carbonáticas da Formação Sete Lagoas:
Grupo Bambuí – Arcos, MG"*

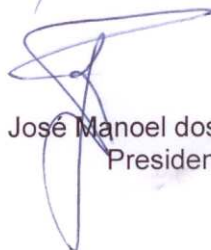
Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Exploratória, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada por:



Prof. Dr. Alexandre Uhlein - UFMG



Prof. Dr. Carlos José Souza de Alvarenga – UnB



Prof. Dr. José Manoel dos Reis Neto - UFPR
Presidente

Curitiba, 4 de abril de 2012.

*Dedico esse trabalho aos meus amados pais: Glaci e Sérgio,
que sempre compreenderam e apoiaram incondicionalmente a minha
pesquisa.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. José Manoel dos Reis Neto, pelas oportunidades de pesquisa, acompanhamento profissional, orientação, motivação e amizade.

Ao Laboratório de Análises de Minerais e Rochas - LAMIR, por toda infraestrutura à disposição da pesquisa, análises realizadas nessa pesquisa e à equipe de funcionários, sempre solícita e prestativa.

Ao Programa de Recursos Humanos da ANP, pela bolsa de pesquisa, palestras, cursos e eventos que promoveram uma maior proximidade minha com a realidade profissional do setor de petróleo. À prof^a Mazé e ao Alysson, pela solicitude e confiança na pesquisa, aproximando as áreas de Engenharia e Geologia.

À Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, pela confiança e livre acesso às dependências da Mineração Bocaina e à rotina de atividades da empresa, bem como à coleta de amostras sempre que foi necessário.

Ao Joaniel e aos geólogos Reinaldo e Talita, pelos esforços para a concretização das visitas, esclarecimentos e acompanhamento nas atividades de campo; aos demais membros da CSN Robson e Kledson, pelo interesse e discussões a respeito da pesquisa.

Ao Laboratório de Laminação – LAMIN, pela confecção das lâminas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, em especial ao secretário Daniel, pela solicitude e apoio.

À Fernanda, pela disponibilidade, interesse e ajuda com a preparação das amostras para análises no LAMIR.

Aos amigos Ana, Laís, Márgia, Alessandra, Silmara, Clarice, Rodrigo, Gabriela, Áurea, Bárbara, Sueli, Francielle, Evelin, Carlos, Mikael e Keiji, pela amizade e paciência durante o tempo de convivência, dúvidas e pesquisas compartilhadas, participação nas numerosas apresentações, discussões e auxílio nas análises.

Ao Gustavo, pelo companheirismo, amizade, paciência, disponibilidade, apoio, interesse e discussões durante toda a pesquisa e ainda, pelo auxílio com as edições de imagens e formatações finais do texto.

Ao Almério, pela infinita paciência com as alunas e por todas as correções, conselhos, discussões e esclarecimentos, sempre que solicitado.

Ao Alexandre Uhlein, pelo interesse na pesquisa, pelas correções e sugestões de discussões a serem feitas para conclusão da dissertação, enriquecendo a mesma.

Aos professores e funcionários do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, que auxiliaram com orientações e incentivos.

A todas as instituições e pessoas não citadas, mas que colaboraram de alguma maneira para a construção dessa pesquisa.

“Não ande atrás de mim, talvez eu não saiba liderar.
Não ande na minha frente, talvez eu não consiga segui-lo.
Ande ao meu lado, para podermos caminhar juntos.”

Provérbio Ute

RESUMO

Diversos estudos quimioestratigráficos foram realizados nos carbonatos neoproterozóicos do Grupo Bambuí, especificamente nas rochas da Formação Sete Lagoas, para caracterizações tectono-estratigráficas, paleoambientais, correlações regionais e exploratórias. Esses carbonatos têm relevância exploratória para uso do calcário em diversas aplicações industriais e como potenciais armazenadoras e talvez geradoras de óleo e gás. A região de estudo em Arcos, Minas Gerais, é importante produtora de calcário calcítico para a indústria de cimento e está ao sul de áreas de pesquisa licitadas pela ANP, para exploração de hidrocarbonetos na Bacia do São Francisco. Nessa pesquisa a quimioestratigrafia foi aplicada primeiramente como uma avaliação qualitativa dos carbonatos da Mineração Bocaina, matéria-prima usada pela Companhia Siderúrgica Nacional na indústria siderúrgica e de cimento. O estudo quimioestratigráfico da Formação Sete Lagoas foi realizado a partir de comparações estratigráficas em seção obtida ao longo de aproximadamente 150 m, em testemunhos de sondagem e descrição mesoscópica nas frentes de lavra. Foram feitas análises geoquímicas de elementos maiores e menores, análises mineralógicas e análises isotópicas ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ e $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$), interpretadas de forma integrada. A partir dos intervalos estratigráficos em número de seis (definidos pela mineração para exploração e uso industrial), foram definidas onze fácies sedimentares que, conforme características litológicas e quimioestratigráficas, foram definidas em cinco unidades geoquímicas: 1) Unidade Geoquímica A, com composição dolomítica no topo de até 20% de MgO, passando para calcítica na base, com abundantes estruturas estromatolíticas. Essa unidade mostrou um padrão isotópico para $\delta^{13}\text{C}$ entre +0,5‰ e +1,5‰ e para $\delta^{18}\text{O}$ entre -4‰ e -5‰; 2) Unidade Geoquímica B, intercalação de *wackestone* calcítico e *mudstone* calcítico com brechas sedimentares frequentes, em direção à base laminações escuras e possivelmente carbonosas passam a ocorrer em meio ao calcário, também ocorre brecha calcítica cuja origem pode ser hidrotermal; 3) Unidade Geoquímica C, ocorre um *wackestone* calcítico com gradação para uma margosa, com a presença de micas e argilominerais aumentando em quantidade em direção à base. Nas Unidades B e C a composição é predominantemente calcítica, com 53% CaO, com incipiente aumento nos conteúdos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 na base da Unidade C; 4) Unidade Geoquímica D, continua a intercalação de calcário com o *mudstone* de composição margosa, na base da unidade começam a ocorrer camadas carbonosas escuras. A composição de CaO diminui para 38% enquanto SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 aumentam consideravelmente. Nas Unidades B, C e D observou-se um padrão na assinatura isotópica, com $\delta^{13}\text{C}$ entre 0‰ e +1,5‰ e valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -7‰ e -9‰; 5) Unidade Geoquímica E, há diminuição das camadas de calcário intercaladas ao *mudstone* margoso, com abundantes estratificações carbonosas ricas em matéria orgânica e ocorrências de pirita; nessas estratificações a SiO_2 atinge 39% e a Al_2O_3 , quase 9%. As assinaturas isotópicas dessa unidade são as mais negativas, com valores de -1‰ a -2‰ para $\delta^{13}\text{C}$ e -10,5‰ a -12,5‰ para $\delta^{18}\text{O}$. Para a exploração do calcário, os intervalos utilizados pela mineração na lavra têm pouca correspondência com as unidades definidas, estudos geoquímicos mais detalhados e a implementação de melhorias poderiam significar uma maior sobrevida da mineração. Algumas características, tais como a presença de matéria orgânica nas rochas basais, a ocorrência de fraturamentos, brechas, microporosidade e grutas observadas nos níveis superiores são relevantes para posterior avaliação do potencial exploratório desta formação. A faciologia e as assinaturas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ obtidas ao longo das seções foram correlacionadas regionalmente e interpretadas como rampas carbonáticas marinhas, depositadas sobre possíveis depósitos pós-glaciais.

Palavras-chave: Carbonatos. Arcos. Quimioestratigrafia. Formação Sete Lagoas.

ABSTRACT

Several stratigraphic and chemical analyses have been done in Neoproterozoic carbonate rocks of the Sete Lagoas Formation, Bambui Group, aiming a better understanding in tectonic-stratigraphic, paleoenvironments and ultimately to improve regional and exploratory correlations. These carbonate have relevance for exploration use of limestone in different industrial applications and as a potencial reservatoir in oil and gas. The study area in Arcos, Minas Gerais State is an important cement productive region and lately it has been also a target for oil and gas exploration. The National Petroleum Agency (ANP) has given concessions to Petrobras and other companies for hydrocarbon exploration in the Sao Francisco Basin, including some areas in the neighborhood of the city of Arcos. In the present research, chemical-stratigraphy was initially applied as qualitative evaluation in carbonate rocks of the Bocaina Mineração, used by the Companhia Siderurgica Nacional in metallurgic and cement industry. The chemical-stratigraphic studies of the Sete Lagoas Formation were performed using stratigraphic comparisons using about 150 meters of cores along with geological description in quarries inside the mining area. The geochemical analyses consisted of major and minor elements, mineralogical analysis, and isotopic analysis ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ e $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$), interpreted in an integrated way. The mining company has already defined six exploratory stratigraphic intervals. Using these six intervals as a guide, we defined eleven sedimentary facies grouped into five geochemical units, based mostly in lithological and chemical-stratigraphic aspects: 1) Geochemical Unit A, with stromatolic structures predominantly dolomitic in the top and calcitic towards the base of the unit. These unit revealed an isotopic pattern for $\delta^{13}\text{C}$ between +0,5‰ and +1,5‰, and for $\delta^{18}\text{O}$ between -4‰ and -5‰; 2) Geochemical Unit B, have calcitic wackestones interbedded with calcitic mudstones and sedimentary breccias are frequent. In the lower part of the section, dark laminations are present. It also occurs calcitic breccias of possible hydrothermal origin; 3) Geochemical Unit C, with calcitic wackestone grading into marl, micaceous. Clay minerals increasing towards the lower part of the unit. In the B and C Unities the calcitic composition is predominant, with 53% of CaO, with incipient increment in SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 contents, in the lower part of unit; 4) Geochemical Unit D, have limestones interbedded with marls with dark carbonaceous layers in the basal part. The CaO composition decreases to 38% whereas SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 increases considerably. In the B, C and D Units a pattern for $\delta^{13}\text{C}$ between 0‰ and +1,5‰, and for $\delta^{18}\text{O}$ between -7‰ and -9‰ has been found; 5) Geochemical Unit E, with limestone layers and marls decreases and organic matter-rich carbonaceous layers predominate. Pyrite is present. In these carbonaceous layers SiO_2 reach 39% and Al_2O_3 almost reaches 9%. The isotopic signatures in this unit are the most negatives in locality, with values to $\delta^{13}\text{C}$ between -1‰ to -2‰ and values to $\delta^{18}\text{O}$ between -10,5‰ to -12,5‰. The chemical variation we found should be constantly checked by the exploration of limestones for cement and metallurgic purposes. The intervals used by the mining company have little correlation with our geochemical units. More detailed geochemical studies would improve exploration and could signify longer life for carbonate minings. Some of the described and analysed characteristics such as the presence of organic matter in the lowermost units, fracturing, brecciations, microporosity and caves, are important and should be taken into considerations as good potential for, either reservoir and source rocks for hydrocarbons. Facies and $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ signatures obtained in our studies were regionally correlated and interpreted as marine carbonate ramps deposited on top of possible glacial deposits.

Key-words: Carbonates, Arcos, Chemical-stratigraphy, Sete Lagoas Formation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	Localização da área de estudo.	04
FIGURA 2 -	Planta da Mineração Bocaina com a localização dos furos descritos (em laranja, sendo o furo-guia o de número 06) e das amostras coletadas (em azul).....	06
FIGURA 3 -	Classificação modificada de Dunham, para rochas carbonáticas.....	10
FIGURA 4 -	Detalhe da classificação proposta para rochas carbonáticas.....	12
FIGURA 5 -	Diferentes fases da preparação das amostras, para análises mineralógicas e químicas.....	15
FIGURA 6 -	Exemplo de difratograma de raios X obtido, com picos e minerais correspondentes.	18
FIGURA 7 -	Exemplos de gráficos obtidos para amostras de dolomita (A) e calcita (B), respectivamente	19
FIGURA 8 -	Geologia no Cráton do São Francisco	22
FIGURA 9 -	Mapa estrutural simplificado da porção sul da bacia.....	23
FIGURA 10 -	Quadro com as principais colunas estratigráficas propostas para o Grupo Bambuí.....	24
FIGURA 11 -	Detalhe da geologia da bacia na porção sul.	28
FIGURA 12 -	Detalhe do Neoproterozóico na carta estratigráfica da Bacia do São Francisco	29
FIGURA 13 -	Representação das bacias sedimentares brasileiras	30
FIGURA 14 -	(A) Blocos concedidos nas rodadas de licitações da ANP de 2005 e (B) blocos concedidos em 2008	31
FIGURA 15 -	Localização de poços perfurados com gás e exsudações ao longo da bacia	33
FIGURA 16 -	Visão panorâmica na cota mais elevada (800 m de altitude), para o sentido noroeste da mineração.	36
FIGURA 17 -	Seção litológica com a relação entre os intervalos estratigráficos adotados para exploração na Bocaina e suas diferentes fácies detalhadas.....	38
FIGURA 18 -	Detalhe do Intervalo 1, com a denominação utilizada na mineração e as fácies encontradas.	39

FIGURA 19 - Gradação das fácies <i>wackestone</i> maciça à estratificada (na base) e início da fácies estromatolítica (no topo); próximo à bancada com 800 m de altitude.....	39
FIGURA 20 - (A) Gradação de <i>wackestone</i> microcristalino maciço a estratificado, da base para o topo, respectivamente; (B) <i>wackestone</i> brechado com formação de clastos centimétricos; (C) microporosidade.....	40
FIGURA 21 - (A) Nível micrítico e nível com oóides e intraclastos cristalizados, sob nicóis paralelos; (B) intraclasto com quartzo límpido, junto a espaços vazios circulares, sob nicóis paralelos.	41
FIGURA 22 - Diferentes granulações em contato praticamente abrupto, sob nicóis cruzados.	42
FIGURA 23 - (A) Espaços vazios centrais dos oólitos reliquiais, sob nicóis paralelos; (B) cimento espático dolomítico, sob nicóis cruzados.	42
FIGURA 24 - (A) Fácies <i>packstone</i> com estromatólitos sem perturbação; (B) com estromatólitos apresentando padrão caótico	43
FIGURA 25 - Possíveis estruturas de exposição subaérea preservadas, como gretas de ressecamento (A) e pingos de chuva (B); (C) doloespátos brancos em meio às laminações estromatolíticas.....	44
FIGURA 26 - Testemunho mostrando a variação das fácies, entre 5 m e 10 m de profundidade.	45
FIGURA 27 - Testemunhos com feições de carstificação na fácies <i>wackestone</i> dolomítica.....	45
FIGURA 28 - (A) Laminação micrítica grumosa preservada, sob nicóis cruzados; (B) Possível dolomita em sela, de preenchimento de cavidade, com extinção ondulante, sob nicóis cruzados.....	46
FIGURA 29 - Detalhe do Intervalo 2, com a denominação utilizada na mineração e as fácies encontradas.....	46
FIGURA 30 - (A) <i>Wackestone</i> observado na frente de lavra com estruturas côncavas estromatolíticas; (B) <i>wackestone</i> microbial laminado, observado no testemunho, com colapso das construções estromatolíticas, escala centimétrica.	47
FIGURA 31 - Dois lados de uma amostra de <i>wackestone</i> estromatolítico fraturado, obtida em testemunho; lado com porosidade vugular mesoscópica (A) e lado “maciço” (B).....	48

FIGURA 32 - (A) Laminação micrítica se torna granocrescente em direção ao topo, sob nicóis cruzados; (B) matriz do nível peloidal com cristalização espática límpida, sob nicóis cruzados; (C) estilólito irregular oblíquo, posterior ao fraturamento, sob nicóis paralelos.....	49
FIGURA 33 - (A) Contato abrupto entre a matriz micrítica original e a espática, sob nicóis paralelos; (B) cristalização espática preferencial em níveis anteriormente oolíticos, sob nicóis cruzados.	50
FIGURA 34 - Detalhe do Intervalo 3, com a denominação utilizada na mineração e as fácies encontradas.	50
FIGURA 35 - <i>Wackestone</i> estromatolítico; nota-se doloespatos em meio às laminações estromatolíticas	51
FIGURA 36 - (A) “Bolsão” de argila recobrindo os calcários do piso na cota 750 m; (B) carstificação em bloco do chão próximo, no mesmo piso	52
FIGURA 37 - (A) <i>Wackestone</i> calcítico, observado em frente de lavra na altitude 770 m; (B) variações na fácies <i>wackestone</i> calcítica, com estilólitos; (C) ocorrência de brechas sedimentares.	52
FIGURA 38 - (A) Laminação granulométrica calcarenítica com filmes argilosos entre os cristais, sob nicóis cruzados; (B) intraclasto rudáceo com oóides recristalizados, sob nicóis cruzados.	54
FIGURA 39 - (A) Diferença de cristalinidade da matriz e dos clastos, esses com limites bem definidos, sob nicóis paralelos; (B) cristais de dolomita límpidos e de granulação grossa em relação à matriz, sob nicóis cruzados.	54
FIGURA 40 - (A) <i>Mudstone</i> calcítico com doloespatos observado na frente de lavra; (B) <i>mudstone</i> com brecha sedimentar e doloespatos.....	55
FIGURA 41 - (A) Nível peloidal resistente, com recristalização heterogênea, sob nicóis paralelos; (B) cristalização polimodal em meio à matriz micrítica, sob nicóis cruzados.	56
FIGURA 42 - (A) Nível reliquiar peloidal micritizado em contato gradacional com cimento, sob nicóis paralelos; (B) extinção ondulante em dolomita espática polimodal, sob nicóis cruzados; (C) possível dolomita barroca ocasional no cimento espático, sob nicóis paralelos; (D) estilólitos de diversas amplitudes parecem delimitar o clasto, sob nicóis cruzados.	57

FIGURA 43 - Detalhe do Intervalo 4, com a denominação utilizada na mineração e as fácies encontradas.	58
FIGURA 44 - <i>Mudstone</i> laminado com <i>wackestone</i> peloidal intercalado com matéria orgânica.	58
FIGURA 45 - (A) Cristais de calcita branca e cinza, na frente de lavra; (B) detalhe mesoscópico dos cristais de calcita branca, observado no piso 745 m, com escala centimétrica; (C e D) <i>mudstone</i> dolomítico brechado, configurado em duas localidades diferentes da mineração, ambas na bancada com 750 m altitude.	59
FIGURA 46 - (A) Estruturas primárias microbiais fraturadas e cristalização calcítica preferencial concordante, sob nicóis paralelos; (B) “megacristais” em contato abrupto com a matriz micrítica original, sob nicóis paralelos	60
FIGURA 47 - Detalhe do Intervalo 5, com a denominação utilizada na mineração e as fácies encontradas.	61
FIGURA 48 - Cristalização doloespática concordante (A e B) e fraturas posteriores discordantes à cristalização (B)	62
FIGURA 49 - (A) <i>Wackestone</i> calcítico estratificado na bancada de 725 m altitude; (B) <i>wackestone</i> calcítico, escala da imagem centimétrica; (C) detalhe da estratificação observada na bancada de 710 m de altitude.	63
FIGURA 50 - (A) Laminação micrítica com cristais espáticos preenchendo as vênulas, sob nicóis cruzados; (B) quartzo microcristalino e carbonato na borda inferior da laminação argilosa, sob nicóis cruzados.	64
FIGURA 51 - (A) Ocorrência de quartzo microcristalino e opacos na laminação argilosa, sob nicóis cruzados; (B) nível com estruturas primárias micritizadas e contatos curvos e lobados dos cristais límpidos, sob nicóis paralelos.	65
FIGURA 52 - (A) Estilólitos irregulares geminados, sob nicóis paralelos; (B) níveis reliquiares primários com quartzo microcristalino, sob nicóis cruzados.	66
FIGURA 53 - (A) Estilólitos com várias fases de preenchimento argiloso, sob nicóis paralelos; (B) quartzo microcristalino ocupando estruturas oolíticas, sob nicóis cruzados.	67
FIGURA 54 - (A) Configuração do limite vertical do avanço da lavra; (B) detalhe da	

	estratificação da fácies <i>mudstone</i> transicional	67
FIGURA 55 -	Observação mesoscópica das laminações.	68
FIGURA 56 -	(A) Laminação argilosa criptocristalina intercalada no acamamento micrítico, sob nicóis paralelos; (B) estilólitos discordantes cortando a laminação argilosa, sob nicóis cruzados.	69
FIGURA 57 -	Detalhe do Intervalo 6, com a denominação utilizada na mineração e as fácies encontradas.	69
FIGURA 58 -	(A) Intercalação gradacional da fácies <i>mudstone</i> margosa com as laminações argilo-carbonosas; (B) estratificações argilo-carbonosas contínuas e abruptas com o <i>mudstone</i> margoso.	70
FIGURA 59 -	(A) Diferentes granulações aparentemente separadas por estilólito submilimétrico, sob nicóis cruzados; (B) cristalização espática preferencial no nível oolítico reliquiar micritizado, sob nicóis cruzados.	71
FIGURA 60 -	(A) Acamamento micrítico carbonático homogêneo, sob nicóis cruzados; (B) nível argiloso em contato gradacional com o nível micrítico, sob nicóis paralelos.	71
FIGURA 61 -	(A) Rochas basais distintas às rochas carbonáticas; a seta branca indica o diamictito polimítico, a seta vermelha indica o calcário cristalino impuro e a seta amarela indica o xisto. (B) Diamictito observado na Mineração Bocaina, com escala centimétrica; (C) diamictito descrito por kuchembecker (2011).	73
FIGURA 62 -	(A) Detalhe do calcário cristalino impuro em seção longitudinal e (B) detalhe do xisto do embasamento, em seção transversal	74
FIGURA 63 -	(A) Matriz arcoseana do diamictito, sob nicóis cruzados; (B) material opaco concentrado em meio aos cristais anédricos, sob nicóis cruzados; (C) foliação principal e sub-grãos de quartzo, sob nicóis cruzados; (D) detalhe do cristal de estaurolita em meio à foliação, sob nicóis paralelos.	75
FIGURA 64 -	Perfis das unidades geoquímicas para as rochas do furo-guia (CSNMA-07-006), com dados químicos e mineralógicos.	77
FIGURA 65 -	Perfis das unidades geoquímicas para as rochas do furo-guia (CSNMA-07-006), com dados de elementos maiores.	78
FIGURA 66 -	Perfis das unidades geoquímicas para as rochas do furo-guia	

	(CSNMA-07-006), com dados de elementos maiores.....	79
FIGURA 67 -	Perfis das unidades geoquímicas para as rochas do furo-guia (CSNMA-07-006), com dados de elementos-traço	80
FIGURA 68 -	Perfis das unidades geoquímicas para as rochas do furo-guia (CSNMA-07-006), com dados de mineralogia, por quantificação da difração de raios X	81
FIGURA 69 -	Correspondência, em profundidade e faciologia, dos intervalos de rocha amostrados nos diferentes testemunhos, tendo como base o furo-guia, ilustrado.	82
FIGURA 70 -	Gráficos das médias dos principais óxidos nas rochas do furo-guia (A); testemunho CSNMA -07-001 (B); testemunho CSNMA-07-0016 (C); testemunho CSNMA -07-0019 (D).	83
FIGURA 71 -	Perfis geoquímicos dos elementos maiores e mineralogia, do furo-guia (A) e dos testemunhos 01 (B), 019 (C) e 016 (D).....	85
FIGURA 72 -	Perfis geoquímicos dos elementos maiores do furo-guia (A) e dos testemunhos 01 (B), 019 (C) e 016 (D).	86
FIGURA 73 -	Perfis geoquímicos dos elementos-traço do furo-guia (A) e dos testemunhos 01 (B), 019 (C) e 016 (D).	87
FIGURA 74 -	Gráfico com as médias dos principais óxidos nas rochas do furo-guia, Unidade B.	89
FIGURA 75 -	Gráfico com as médias dos principais óxidos nas rochas do furo-guia, Unidade C.	91
FIGURA 76 -	Gráfico com as médias dos principais óxidos nas rochas do furo-guia, Unidade D.	92
FIGURA 77 -	Gráfico com as médias dos principais óxidos nas rochas do furo-guia, Unidade E.	94
FIGURA 78 -	Perfis com as unidades geoquímicas para as rochas do furo-guia (CSNMA-07-006), com dados de razões elementares e isotópicas.	95
FIGURA 79 -	Gráfico da variação dos valores isotópicos ao longo da Unidade A.	96
FIGURA 80 -	Perfis geoquímicos das razões elementares e isotópicas, do furo-guia (A) e dos testemunhos 01 (B), 019 (C) e 016 (D).....	97
FIGURA 81 -	Gráfico da variação isotópica ao longo da Unidade B, nas rochas do	

furo-guia.....	98
FIGURA 82 - Gráfico da variação isotópica ao longo da Unidade C, nas rochas do furo-guia.....	99
FIGURA 83 - Gráfico da variação isotópica ao longo da Unidade D, nas rochas do furo-guia.....	100
FIGURA 84 - Gráfico da variação isotópica ao longo da Unidade E, nas rochas do furo-guia.....	101
FIGURA 85 - Gráfico com as tendências de variação isotópica, encontradas ao longo do furo-guia e seu significado litológico.....	102
FIGURA 86 - (A) Doloespátos em meio às construções colunares estromatolíticas, no <i>wackestone</i> estromatolítico; (B) doloespátos em meio ao <i>wackestone</i> calcítico.....	103
FIGURA 87 - Gráfico da variação encontrada entre os valores isotópicos obtidos nos doloespátos, em azul, e na dolomita (rocha total) da Unidade A.	104
FIGURA 88 - (A) Ocorrência da brecha calcítica no <i>mudstone</i> magnesiano; (B) ocorrência da brecha calcítica no <i>wackestone</i> calcítico, aproximadamente 30 m abaixo do <i>mudstone</i> magnesiano; (C) fratura preenchida com calcita leitosa no <i>wackestone</i> calcítico; (D) preenchimento de cavidade em fratura por calcita, no <i>mudstone</i> magnesiano.....	105
FIGURA 89 - Gráfico com a dispersão encontrada nos valores isotópicos das calcitas de fraturas e das calcitas de cimentação da brecha.	106
FIGURA 90 - Faciologia descrita na Bocaina e correspondência com as associações de fácies sumarizadas de Vieira (2007)	108
FIGURA 91 - Correlação faciológica esquemática, entre a seção caracterizada na Mineração Bocaina, em cores, e a seção caracterizada por Kuchembecker (2011), em preto-e-branco.	110
FIGURA 92 - Blocos-diagrama esquemáticos mostrando o modelo deposicional de rampa carbonática proposto para a Formação Sete Lagoas	113
FIGURA 93 - Comparação esquemática de assinaturas isotópicas entre seções com profundidades e faciologias semelhantes. (A) Mineração Bocaina; (B) área próxima, caracterizada por Kuchembecker	116
FIGURA 94 - Comparação dos perfis isotópicos de diversas partes da bacia, tendo	

como <i>datum</i> a excursão positiva dos valores de $\delta^{13}\text{C}$. A seção identificada “Arcos 2” representa o perfil isotópico obtido nessa pesquisa.....	120
FIGURA 95 - Detalhe do início da incursão isotópica positiva conforme é observado destacado no furo-guia (A), obtido no testemunho 001 (B)	121
FIGURA 96 - Comparação da relação entre os teores de MnO e os valores de $\delta^{18}\text{O}$ dos carbonatos. (A) área próxima, caracterizada por Kuchembecker (2011); (B) valores obtidos na Mineração Bocaina, sobrepostos	123

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	RELAÇÃO DAS AMOSTRAS COLETADAS NA MINERAÇÃO BOCAINA.	07
TABELA 2 -	DISPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS LAMINADAS NOS TESTEMUNHOS.....	11
TABELA 3 -	RESULTADOS ESPERADOS COM A COLORIMETRIA. MODIFICADA DE DICKSON (1966).....	13
TABELA 4 -	ÓXIDOS E ELEMENTOS ANALISADOS NA LINHA ANALÍTICA CALCÁRIO PRENSA.	16
TABELA 5 -	VALORES ISOTÓPICOS DAS DOLOMITAS DIAGENÉTICAS.....	104
TABELA 6 -	VALORES ISOTÓPICOS DAS CALCITAS DE CIMENTAÇÃO (IDENTIFICADAS COM ASTERISCO) E DE PREENCHIMENTO DE FRATURAS.....	106

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS	3
2 MATERIAIS E MÉTODOS	5
2.1 DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	9
2.1.1 Termos Descritivos Utilizados	13
2.2 TÉCNICA DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	14
2.3 TÉCNICA DA DIFRAÇÃO DE RAIOS X	16
2.4 TÉCNICA DA TERMOGRAVIMETRIA	18
2.5 TÉCNICA DE ISÓTOPOS DE CARBONO E OXIGÊNIO	20
3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	21
3.1 CRÁTON SÃO FRANCISCO	21
3.2 GRUPO BAMBUÍ	25
3.3 INTERESSE EXPLORATÓRIO NA BACIA DO SÃO FRANCISCO	30
3.4 QUIMIOESTRATIGRAFIA NA FORMAÇÃO SETE LAGOAS	34
4 ESTRATIGRAFIA DA MINERAÇÃO BOCAINA	36
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS LITOTIPOS EXPLORADOS NA MINERAÇÃO	36
4.2 FACIOLOGIA DO INTERVALO 1	38
4.2.1 Fácies <i>Wackestone</i> Dolomítica	39
4.2.2 Fácies <i>Packstone</i> Estromatolítica	42
4.3 FACIOLOGIA DO INTERVALO 2	46
4.3.1 Fácies <i>Wackestone</i> Estromatolítica	47
4.4 FACIOLOGIA DO INTERVALO 3	50
4.4.1 Fácies <i>Wackestone</i> Estromatolítica	51
4.4.2 Fácies <i>Wackestone</i> Calcítica	52
4.4.3 Fácies <i>Mudstone</i> Calcítica	55
4.5 FACIOLOGIA DO INTERVALO 4	57
4.5.1 Fácies <i>Mudstone</i> Magnesiana	58
4.5.2 Fácies Brecha Calcítica	58
4.6 FACIOLOGIA DO INTERVALO 5	61
4.6.1 Fácies <i>Wackestone</i> Calcítica	61

4.6.2 Fácies <i>Mudstone</i> Transicional	67
4.7 FACIOLOGIA DO INTERVALO 6.....	69
4.7.1 Fácies <i>Mudstone</i> Margosa.....	69
4.7.2 Fácies Basal	72
5 QUIMIOESTRATIGRAFIA NA MINERAÇÃO BOCAINA	76
5.1 UNIDADE GEOQUÍMICA A	82
5.2 UNIDADE GEOQUÍMICA B	88
5.3 UNIDADE GEOQUÍMICA C	90
5.4 UNIDADE GEOQUÍMICA D	91
5.5 UNIDADE GEOQUÍMICA E	92
5.6 ANÁLISES ISOTÓPICAS DE CARBONO E OXIGÊNIO.....	94
5.6.1 Análise dos Carbonatos Diagenéticos e de Cimentação	102
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	107
6.1 CORRELAÇÕES REGIONAIS E MODELO DEPOSICIONAL	107
6.2 UNIDADES INDIVIDUALIZADAS E VARIAÇÕES ISOTÓPICAS.....	114
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	124
REFERÊNCIAS.....	127
APÊNDICES	132

1 INTRODUÇÃO

A estratigrafia química ou quimioestratigrafia é o estudo das variações na composição química de uma sequência estratigráfica, que pode ou não ser sedimentar, a partir das diferentes litologias. Nas rochas sedimentares, as assinaturas químicas das litologias (alvo da quimioestratigrafia) comumente resultam das interações químicas das rochas com a água do mar, das condições ambientais do momento ou logo após a deposição dos sedimentos e podem também ser indicadoras da proveniência dos sedimentos. Essa ferramenta permite ainda, descobrir a sucessão/superposição dos eventos impostos às rochas.

Nessa pesquisa, o emprego da quimioestratigrafia foi realizada na Mineração Bocaina, no Município de Arcos, Minas Gerais. Essa mineração é uma das unidades operacionais da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e localiza-se em uma das maiores reservas calcárias do país. É responsável pelo suprimento de fundentes siderúrgicos (calcário e dolomito) para a Usina Presidente Vargas em Volta Redonda, RJ. Em 2007, a mina transferiu para a usina 1,9 milhão de toneladas de calcário e dolomito, consumidos nos altos-fornos. Os rejeitos do processo são depositados nas barragens de decantação e, posteriormente, vendidos como corretivos de solo.

A capacidade de produção da Mineração Bocaina é de 4 milhões de toneladas de fundentes e, além do suprimento de calcário siderúrgico, é também responsável pelo fornecimento do “calcário não siderúrgico”, utilizado para a produção de clínquer, matéria-prima para a fabricação de cimento.

Na mineração, refletindo o contexto regional, ocorre intercalação de camadas de calcários dolomíticos estromatolíticos, calcíticos e pelitos. Essas litologias situam-se na base do Grupo Bambuí e correspondem mais precisamente, à interdigitação das Formações proterozóicas Sete Lagoas e Serra de Santa Helena. O estudo detalhado das sequências carbonáticas exploradas na mineração, com composições químicas distintas, permite um melhor conhecimento dessas variações, bem como a origem e controle das mesmas.

A quimioestratigrafia se desenvolve com a aplicação de dados geoquímicos orgânicos e inorgânicos. Esse estudo integrado tem sido amplamente utilizado

especialmente em casos de bacias petrolíferas ou potenciais, para um maior conhecimento do reservatório e determinação das anomalias (RODRIGUES, 2005).

O uso dessa ferramenta é particularmente importante para estudar seqüências pré-cambrianas, nas quais o registro esparso de fósseis possibilita um uso limitado da bioestratigrafia. Segundo Jacobsen e Kaufman (1999), apenas poucas seqüências sedimentares têm sua cronologia absoluta bem determinada, e a bioestratigrafia para esse período de tempo ainda possui amplas restrições.

A maioria dos sistemas petrolíferos neoproterozóicos ou do Cambriano Inferior podem ser classificados como sistemas produtores comprovados ou potenciais (CRAIG *et al.*, 2009), por essa razão são necessários implementações e aperfeiçoamentos metodológicos modernos. Campos potenciais em bacias proterozóicas com óleo e gás são conhecidos na Sibéria, em Omã e na China, entre outros.

O estudo nessas rochas exemplifica a aplicação da quimioestratigrafia como aliada às metodologias convencionais e rotineiras de pesquisa e exploração nas bacias sedimentares com potencial energético. Poços perfurados com indícios de gás e notícias de exudações naturais nas porções centrais da Bacia do São Francisco, revelam potencialidades que estão em monitoramento através da crescente licitação de blocos para pesquisas, principalmente no sul de Minas Gerais, nos Municípios de Bambuí, Luz e Lagoa da Prata, vizinhos a Arcos.

Os carbonatos da Formação Sete Lagoas, no contexto de petróleo e gás, podem atuar como geradores e/ou reservatórios, portanto é importante a compreensão de seus processos geradores, a caracterização e evolução da porosidade, envolvendo fraturamentos e dolomitização – fenômenos evidentes nas observações de campo. Segundo Evans, Cade e Bryant (1998) a porosidade e permeabilidade são importantes parâmetros que ajudam a definir a viabilidade comercial de uma acumulação de óleo ou gás.

Pesquisas cronoestratigráficas em rochas pré-cambrianas são publicadas com o objetivo de compreender eventos glaciais do final do Proterozóico. Suas possibilidades de correlação global com assinaturas isotópicas indicativas têm como base a hipótese de que, algumas vezes durante o Neoproterozóico, os continentes estariam cobertos por neve e gelo e os oceanos estariam congelados (HOFFMAN, 1999). O Neoproterozóico na Bacia do São Francisco reúne estudos especialmente de determinações tectono-estratigráficas, paleoambientais e de reconhecimento e

propostas acerca dos “carbonatos de capa”, rochas características de terem sido depositadas logo após as glaciações.

1.1 OBJETIVOS

Esse trabalho de pesquisa tem como objetivo principal caracterizar a quimioestratigrafia da Mineração Bocaina, com base:

- na estratigrafia e conteúdo mineralógico observados mesoscopicamente e em descrições petrográficas, nas frentes de lavra e em testemunhos;
- na interpretação dos resultados geoquímicos (elementos maiores e traços) e isotópicos;
- na interpretação dos novos dados, integrando-os com dados bibliográficos.

Os estudos quimioestratigráficos feitos até o momento para regiões do extremo sul da bacia, têm enfoque no resultado isotópico de C, O, Sr e nas suas correlações regionais. A proposta desse trabalho é usar a quimioestratigrafia como ferramenta de integração dos intervalos de rochas que são explorados na mineração, com a estratigrafia e as variações geoquímicas encontradas. Para isso foram utilizadas diversas técnicas analíticas, apoiadas em seções estratigráficas da Mineração Bocaina. Essas seções possuem assinaturas geoquímicas diagnósticas, que permitem correlacioná-las estratigraficamente entre si, e com as seções descritas na área, em bibliografias.

1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

A área de estudo (FIGURA 1) localiza-se aproximadamente a 240 km sudoeste de Belo Horizonte, distante 6 km do Município de Arcos, na Mineração Bocaina da Companhia Siderúrgica Nacional, com as coordenadas UTM 438.602 / 7.753.628.

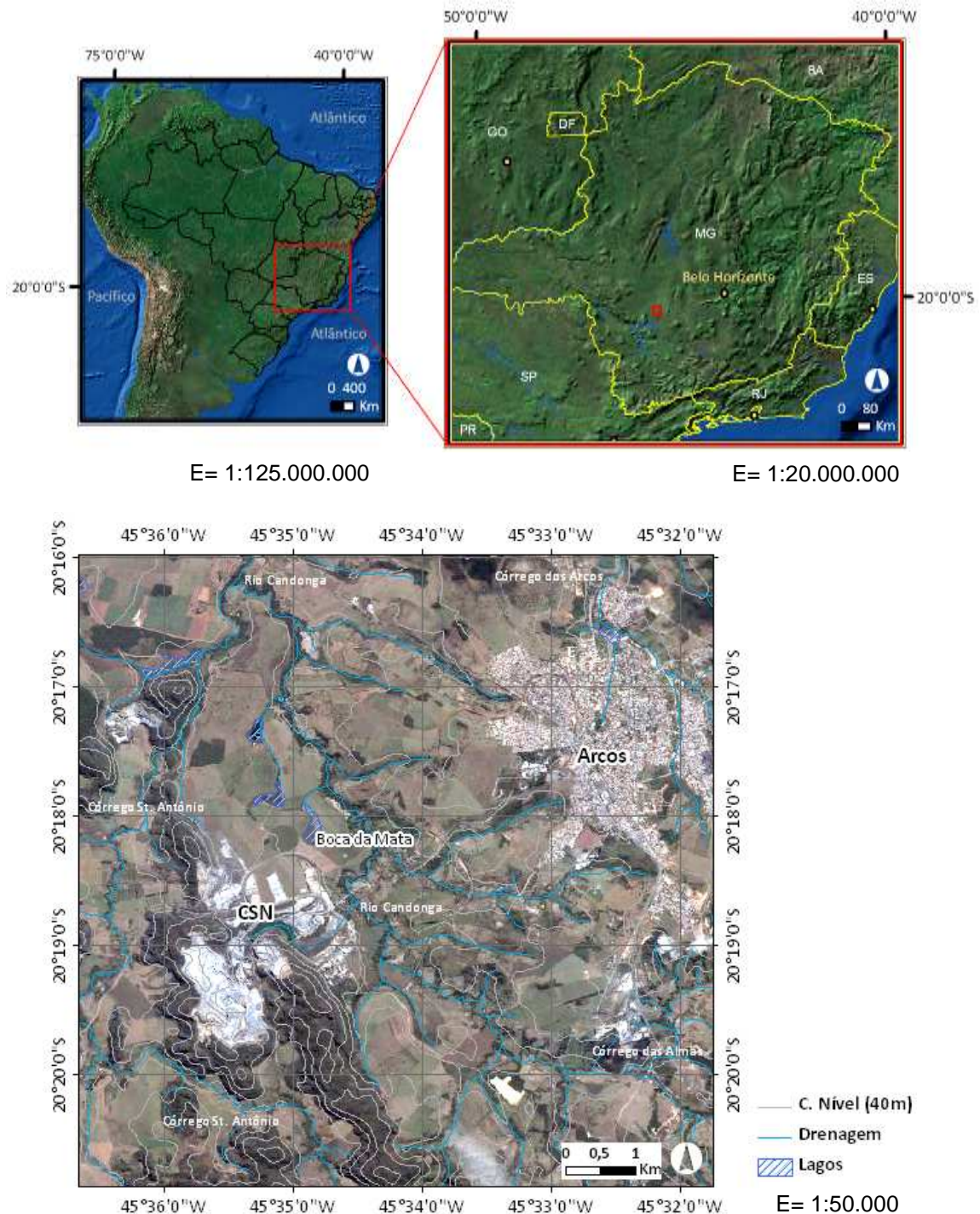


FIGURA 1 – Localização da área de estudo.
FONTE: O autor (2010).

O acesso à área pode ser feito partindo-se de Belo Horizonte em direção à saída para Betim, pela MG-424 até a Lagoa da Pampulha e em seguida, respectivamente, à Av. Presidente Antônio Carlos e Anel Rodoviário, passando pela BR-262. Toma-se a MG-50 passando pelos acessos para Itauna, Divinópolis e próximo a Formiga, segue-se para a BR-354, em direção à Arcos e Iguatama.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi feito levantamento bibliográfico da área de estudo e uma breve análise regional (como características da drenagem e traçado dos principais alinhamentos positivos e negativos) utilizando-se imagens de modelo digital de terreno negativa e imagem de satélite com sombreamento.

O levantamento bibliográfico inicial foi seguido de uma primeira etapa de campo, em Julho do ano de 2010. Essa primeira etapa consistiu no reconhecimento da geologia da mineração, com descrição faciológica e amostragem das frentes de lavra e dos testemunhos de sondagem, com duração de uma semana. Uma segunda etapa de campo com a mesma duração ocorreu ao final de Maio de 2011, visando amostragem e descrições complementares à pesquisa em andamento.

As amostras obtidas na primeira etapa, retiradas dos testemunhos, são de uma campanha de sondagem realizada pela CSN em 2007. Quatro testemunhos foram amostrados com um intervalo de aproximadamente 2 m. A localização na mineração, das amostras dos testemunhos e das amostras das frentes de lavra, pode ser visualizada na FIGURA 2 e sua relação está na TABELA 1.

Somente um dos testemunhos analisados atravessa todas as camadas explotadas (o testemunho CSNMA-FSD-07-006) que foi inteiramente descrito e amostrado, sendo considerado “furo-guia”, ou base para a correlação dos demais testemunhos; nesses outros somente os intervalos iniciais, do topo da mineração, puderam ser amostrados.

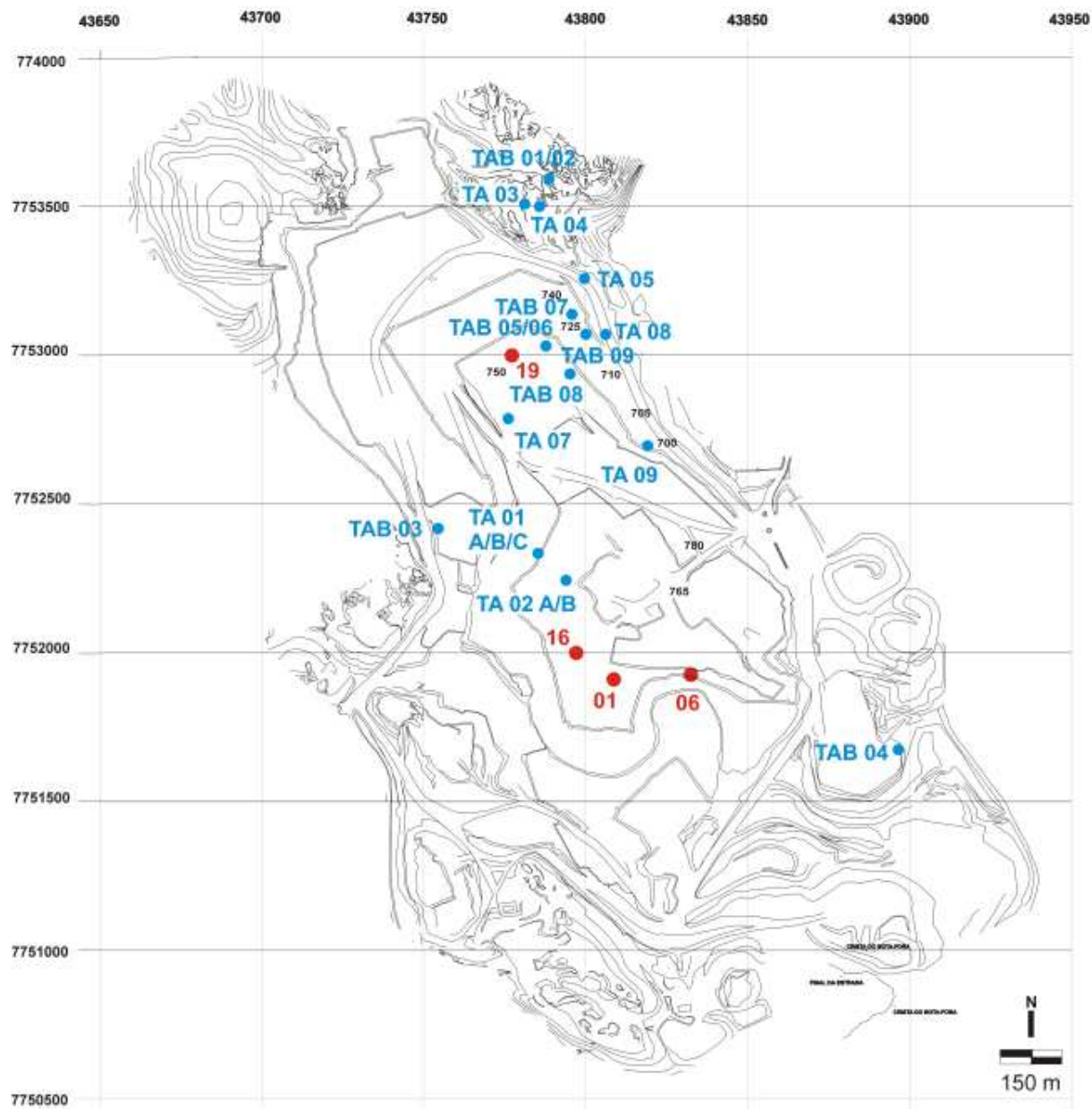


FIGURA 2 – Planta da Mineração Bocaina com a localização dos furos descritos (em laranja, sendo o furo-guia o de número 06) e das amostras coletadas (em azul).
 FONTE: O autor (2010), cedido por CSN.

TABELA 1 – RELAÇÃO DAS AMOSTRAS COLETADAS NA MINERAÇÃO BOCAINA

CSNMA-FSD-07-006			CSNMA-FSD-07-006		
UTM: 438253 / 7751897			UTM: 438253 / 7751897		
Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	Prof. (m)	Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	Prof. (m)
TACX1 01	2	1,25	TACX23 24a	62	96,00
TACX2 03	5A	3,05	24b	63	98,25
TACX2 03	5B	3,06	TACX24 25a	64	100,10
TACX3 04	20	18,00	25b	65	102,40
TACX4 05	22	22,50	TACX25 26a	66	104,15
TACX6 07	26	31,10	26b	67	106,45
TACX7 08	27	35,00	TACX26 27a	68	107,45
TACX8 09	28	37,50	27b	70	110,50
TACX9 10	29	42,80	TACX27 28a	71	112,40
TACX10 11	30	45,00	28b	72	115,00
TACX11 12a	31	48,00	TACX28 29a	73	116,80
12b	32	50,00	29b	74	119,00
TACX12 13a	33	52,00	TACX29 30a	75	119,30
13b	34	54,00	30b	76	122,00
TACX13 14a	35	56,00	TACX30 31a	77	123,70
14b	36	59,00	31b	78	124,70
TACX14 15a	39	60,90	TACX31 32a	79	127,80
15b	40	63,00	32b	80	129,20
TACX15 16a	45	65,60	TACX32 33a	81	131,00
16b	46	66,60	33b	82 A	132,80
TACX16 17a	47	67,00	33b	82B	132,85
17b	48	69,90	33b	82 C	133,88
TACX17 18a	49	71,70	TACX33 34a	83 A	134,00
18b	50	74,00	34a	83 B	134,05
TACX18 19a	51	76,65	TACX33 34b	84 A	135,90
19b	52	78,65	34b	84 B	135,96
TACX19 20a	53	79,50	TACX34 35a	85	138,85
20b	54	81,50	35b	86	140,50
TACX20 21a	55	83,60	TACX35 36a	87 A	142,00
21b	57	86,45	36a	87 B	142,02
TACX21 22a	58	87,30	TACX35 36b	88	144,00
22b	59	90,50	TACX36 37a	89	146,60
TACX22 23a	60	91,45	TACX36 37b	90	146,80
23b	61	95,00	TACX36 37c	91	147,10

TABELA 1 – RELAÇÃO DAS AMOSTRAS COLETADAS NA MINERAÇÃO BOCAINA

continuação

CSNMA-FSD-07-001		
UTM: 438156 / 7751993		
Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	Prof. (m)
TAF1CX1 38a	1	0,20
38B	3	2,00
TAF1CX2 39A	7	5,40
39B	9	6,70
TAF1CX3 40A	8	5,80
40B	12	8,80

CSNMA-FSD-07-016		
UTM: 437998 / 7752020		
Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	Prof. (m)
TAF16CX2 41a	17	14,80
41b	18	16,20
TAF16CX3 42a	19	18,00
42b	21	20,80

CSNMA-FSD-07-019		
UTM: 437671 / 7752982		
Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	Prof. (m)
TAF19CX2 43a	4	3,00
43b	6	5,00
TAF19CX3 44a	10	7,15
44b	11	8,20
TAF19CX4 45a	15	10,75
45b	16	12,00

AMOSTRAS DAS FRENTES DE LAVRA			
Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	Altitude	UTM
TA02 A	13	800	437.968 / 7.752.356
TA02 B	14	800	437.968 / 7.752.356
TA01 A	23	780	437.881 / 7.752.351
TA02 B	24	780	437.881 / 7.752.351
TA02 C	25	780	437.881 / 7.752.351
TA 03	37	750	437.825 / 7.753.539
TA 07	38	750	437.868 / 7.752.800
TA 04	41	745	437.853 / 7.753.524
TA 05	42	745	438.017 / 7.753.324
TA 08	56	725	438.206 / 7.753.059
TA 09	69	700	438.291 / 7.752.724
TAB 01	92	750	437.759 / 7.753.006
TAB 02	93	750	437.759 / 7.753.006
TAB 03	94	790	437.144 / 7.752.496
TAB 04	95	780	437.964 / 7.752.515
TAB 05	96	750	437.757 / 7.752.925
TAB 06	97	750	437.757 / 7.752.925
TAB 07	98	760	438.072 / 7.753.292
TAB 08	99	750	438.013 / 7.753.338
TAB 09	100	740	438.144 / 7.753.196

A faciologia da mineração tem como base o testemunho CSNMA-FSD-07-006, que é apresentado no Capítulo 4 em escala vertical 1:10. A descrição e classificação da rocha em escala mesoscópica (utilização do termo segundo FETTES E DESMONS, 2007) foi feita com base na associação da composição litológica com a variação granulométrica, comumente utilizada em cartas estratigráficas e exposto em Milani *et al.* (2007).

De acordo com Posamentier e Walker (2006), o conceito de fácies (para descrição e organização das rochas) é de camadas de rochas com aspectos litológicos, estruturais e orgânicos detectáveis no campo. Essas fácies podem ter designações informais (como Fácies A, etc.), ou designações descritivas; entende-se que as fácies são as unidades que possibilitarão, em última instância, a interpretação ambiental.

A faciologia descrita na mineração foi detalhada dentro dos “intervalos práticos” existentes (utilizados na CSN), que até o momento têm como base distinções litológicas e químicas, porém dissociadas. Correlacionou-se ainda a faciologia da Mineração Bocaina com as associações de fácies descritas em seções regionalmente correlacionadas por Martins (1999), Vieira (2007) e Kuchembecker (2011), visando integrar os dados faciológicos, geoquímicos e isotópicos ao modelo paleogeográfico atualmente mais aceito.

O termo “unidades geoquímicas” foi utilizado para denominação de intervalos distintos em profundidade, mas que são quimicamente, mineralogicamente e/ou isotopicamente correlacionáveis.

2.1 DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

As amostras submetidas às análises geoquímicas foram acompanhadas de descrição criteriosa mesoscópica e das suas seções delgadas. Segundo Kaufman e Knoll (1995) seções delgadas de carbonatos micríticos, oolíticos ou estromatolíticos são avaliadas petrograficamente pela granulação do grão e grau de recristalização, bem como abundância de componentes detríticos e autigênicos, estilólitos, veios e alterações associadas à intemperismo; a abundância e coloração da matéria orgânica também podem ser avaliadas qualitativamente. Amostras que

apresentarem recristalização significativa, altas concentrações argilosas e forte oxidação devem ser analisadas com cuidado quanto às suas alterações secundárias.

Foi realizada a descrição petrográfica, através da qual são visualizados aspectos sedimentares primários e deformacionais, enriquecendo a seção estratigráfica e permitindo classificar o tipo de rocha. Nessa pesquisa foram descritas 24 lâminas, relacionadas na TABELA 2; a classificação foi feita segundo o modelo de Dunham de 1962, conforme ilustrado em Terra *et al.* (2009), na FIGURA 3, que tem como base a textura deposicional.

Para os carbonatos com possível origem microbial, foi usada a terminologia encontrada em Riding (2000) e a posterior compilação desse feita por Terra *et al.* (2009), para os casos em que ocorrem elementos ligados durante a formação da rocha (FIGURA 4). Na porção dolomítica superior da seção litológica observa-se relevante recristalização da rocha original, no entanto, para se manter um padrão de classificação ao longo da seção, tentou-se manter a relação matriz vs. constituintes. Ressalta-se que nas rochas dolomíticas com estromatólitos, esses são autóctones, ou seja, admite-se que não ocorreu retrabalhamento desses elementos.

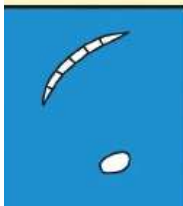



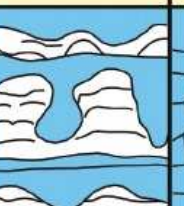

TEXTURA DEPOSICIONAL RECONHECÍVEL					Textura deposicional não-reconhecível
Componentes originais não-ligados durante a deposição				Componentes originais ligados durante a deposição	
Contém Matriz (Partículas tamanho argila/silte fino)			Sem matriz, grão-suportado		
Suportado pela matriz		O arcabouço é grão-suportado com matriz			
Menos de 10% de grãos	Mais de 10% de grãos				
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone	Crystalline
					

FIGURA 3 – Classificação modificada de Dunham, para rochas carbonáticas.
FONTE: Terra *et al.* (2009).

TABELA 2 – DISPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS LAMINADAS NOS TESTEMUNHOS

TESTEMUNHO CSNMA-FSD-07-001		
Lâmina	Prof. (m)	Fácies
F1 38B	2,00	<i>wackestone</i> dolomítico
F1 40A	5,80	<i>packstone</i> estromatolítico
TESTEMUNHO CSNMA-FSD-07-006		
Lâmina	Prof. (m)	Fácies
F6 03	3,05	<i>wackestone</i> brechado
F6 04	18,00	<i>wackestone</i> brechado
F6 10	42,80	<i>wackestone</i> calcítico
F6 12A	48,00	<i>mudstone</i> calcítico
F6 14B	59,00	<i>mudstone</i> calcítico
F6 17B	69,90	<i>wackestone</i> calcítico
F6 19B	78,65	<i>wackestone</i> calcítico
F6 22A	87,30	<i>wackestone</i> calcítico
F6 25B	102,40	<i>wackestone</i> calcítico
F6 28B	115,00	<i>mudstone</i> transicional
F6 31B	124,70	<i>mudstone</i> margoso
F6 35A	138,85	<i>mudstone</i> margoso
F6 37A	146,60	diamictito
F6 37B	146,80	diamictito
F6 37C	147,10	quartzo-biotita-estaurolita xisto
TESTEMUNHO CSNMA-FSD-07-016		
Lâmina	Prof. (m)	Fácies
F16 41B	16,20	<i>packstone</i> estromatolítico
F16 42B	20,80	<i>wackestone</i> estromatolítico
TESTEMUNHO CSNMA-FSD-07-019		
Lâmina	Prof. (m)	Fácies
F19 45B	12,00	<i>packstone</i> estromatolítico
AMOSTRAS DE FRENTES DE LAVRA		
Lâmina	Bancada (altit.)	Fácies
TA 05	745	<i>mudstone</i> laminado
TA 07	750	<i>packstone</i> calcítico
TA01 B	780	<i>wackestone</i> calcítico
TA02 A	800	<i>wackestone</i> dolomítico











	NOMENCLATURA PRINCIPAL	TEXTURA	DEFINIÇÃO	NOMENCLATURA COMPLEMENTAR	REFERÊNCIA OU MODIFICADO DE
Elementos ligados durante a formação - <i>in situ</i>	BOUNDSTONE		Rocha formada <i>in situ</i> cujos componentes da trama original (fábrica original) foram ligados durante a deposição.	"*" principais organismos formadores: ex. coralgal, a rudistas, a estromatoporóides, etc...	Dunham (1962)
	ESTROMATOLITO		ESTROMATOLITO		Riding (2000)
			ESTROMATOLITO ARBORESCENTE - os componentes internos se organizam de forma ramificada divergente e possuem comprimento maior que a largura.		
			ESTROMATOLITO ARBUSTIFORME - os componentes internos se ramificam ou não desde a base e a razão altura/largura é aproximadamente 1:1.		
			ESTROMATOLITO DENDRIFORME - os componentes internos se organizam de forma intensamente ramificada divergente em que o comprimento é muito maior que a largura.		
	TROMBOLITO		Depósito com textura macroscópica coagulada (clotted), maciça e dômica. Na maioria das vezes de origem microbiana.		
	DENDROLITO		Depósito microbiano de estrutura dendrítica formada por cianobactérias esqueléticas.		Este trabalho
	LEIOLITO		Carbonato microbiano dômico, sem laminação ou coágulos.		
	ESFERULITO		Rocha composta por partículas de formas esféricas ou subesféricas de contornos lisos ou lobados (esferulitos) de tamanho geralmente inferior a 2 mm e que podem ocorrer de forma amalgamada ou isolados.	Esferulito-suportado com argila (>10%)= ESFERULITO COM ARGILA; Argila-suportado, com esferulitos= ARGILITO COM ESFERULITOS; No caso da argila ocorrer em lamelas= ARGILITO LAMELAR COM ESFERULITOS	
	TRAVERTINO & (TUFA)		Rocha carbonática bandeada formada pela precipitação em superfície de soluções concentradas em CaCO ₃ ao redor de fontes (em geral quentes) devido a perda de CO ₂ por evaporação. A variedade mais esponjosa e menos compacta é denominada TUFa.		Riding (2000); Pettijohn (1957)

FIGURA 4 – Detalhe da classificação proposta para rochas carbonáticas.
 FONTE: Terra *et al.* (2009).

A colorimetria é uma técnica amplamente utilizada para determinação, principalmente de calcita e dolomita, através de distinção de cores, para uma melhor descrição de amostras e lâminas petrográficas. Para a colorimetria dos carbonatos será seguida a metodologia e tabela comparativa de resultados, adotada por Dickson (1966).

É necessário inicialmente a preparação de HCl na diluição de 0,15%. Prepara-se então a solução alizarina (0.15 g de alizarina *red-S* monohidratada em 100 mL de HCl a 0,15%) e a solução ferrocianeto de potássio (1,5 g de ferrocianeto cristalizado em 100 mL de HCl a 0,15%). A solução de alizarina contém as proporções de 0,075 mL de alizarina, 0,075 mL de ferrocianeto de potássio e 50 mL de ácido clorídrico. Pinga-se então algumas gotas sobre a área desejada e em seguida lava-se a lâmina com água. Os resultados esperados ou diferentes colorações podem ser visualizados na TABELA 3.

TABELA 3 – RESULTADOS ESPERADOS COM A COLORIMETRIA

Carbonato	Alizarina (red-S)	Ferricianeto de potássio
Rodocrosita	---	Marrom muito claro
Ferro Dolomita	---	Turquesa claro a escuro
Ferro Calcita	Rosa a rosa claro	Turquesa claro a escuro
Calcita	Rosa a rosa claro	---
Aragonita	Rosa claro	---

FONTE: MODIFICADO DE DICKSON (1966).

2.1.1 Termos Descritivos Utilizados

Para descrição de certas lâminas, alguns termos que talvez tenham uso pouco comum, foram empregados segundo as respectivas definições utilizadas.

Além dos estromatólitos, o termo associado “microbial” refere-se a estruturas organossedimentares ou bioconstruções que não possuem características distintivas mesoscopicamente, porém possuem uma microfábrica compatível com as encontradas em esteiras microbianas. Segundo Lopes (1995), admite-se que ambos estromatólito e microbial têm origem na integração dos microorganismos bentônicos -possivelmente cianobactérias - com o meio ambiente no qual se desenvolveram. A definição do termo, bem como suas variações, encontram-se em Walter (1976) e em trabalhos de Riding, R.

Segundo Flügel (2004) a dolomita “barroca” ou dolomita “em sela” é um dos critérios a ser usado na avaliação de dolomitização diagenética, juntamente com seu conteúdo em ferro e com o fato de geralmente somente a matriz sofrer dolomitização (*matrix dolomite*). Ele descreve esse tipo de dolomita com granulação grossa, cristais branco-leitosos a marrons e curvos como selas, devido à rotação dos cristais nos eixos-x (distorções no retículo cristalino); também possuem inclusões fluidas abundantes.

Comumente a dolomita em sela é interpretada como sendo formada em depósitos de compactação em profundidades, sob condições hidrotermais de salmouras de altas temperaturas, ou como um sub-produto da redução termoquímica do sulfato (FLÜGEL, 2004).

A descrição textural de dolomita foi feita segundo a classificação observada em Scholle e Ulmer-Scholle (2003). Fábricas com distribuição irregular de cristais anédricos de dolomita são denominadas “não-planares”, enquanto fábricas que possuam contatos predominantemente planares entre os cristais podem ser denominadas “planar-e” ou “planar-s”, quando os cristais forem euédricos ou subédricos, respectivamente. Essa descrição pode ainda ser complementada com contribuições de outros autores, como tamanho dos cristais, remetendo às nucleações e variabilidade de ocorrência (“unimodal” ou “polimodal”).

2.2 TÉCNICA DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Quanto à preparação das amostras, no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas da UFPR (LAMIR) as amostras foram lavadas, fotografadas, encaminhadas à laminação e preparadas, através de métodos destrutivos, para análise química por fluorescência de raios X, ou FRX, análise mineralógica por difratometria de raios X, ou DRX, quantificação de calcita e dolomita por termogravimetria, ou ATG e isótopos de $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ e $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$. A preparação das amostras no LAMIR compõe-se de:

- Quebra do material manualmente em fragmentos < 4 mm e separação de cerca 30 gramas de amostra para as análises químicas e mineralógicas.
- Pulverização de 30 g de amostra, transformando-as em pó, em moinho de painelas (marca *AMEF*) de disco orbital (marca *Marconi*). Após a pulverização as amostras são colocadas em estufa a 70°C por 12 h oras.
- Após a pulverização, prepara-se a amostra (FIGURA 5) para as análises de fluorescência de raios X e difração de raios X, sendo necessária a confecção de:
- Pastilha prensada para FRX; a pastilha é feita pesando-se 7,0 gramas de amostra pulverizada com 1,4 gramas de cera orgânica, posteriormente homogeneizada e prensada com 20 toneladas, em prensa da marca *Pfaff*, usando o programa convencionado para calcários.

- Perda ao fogo para FRX, realizada em mufla ficando 2 gramas de amostra pulverizada exposta por quatro horas a 1000°C, para fechamento da análise química.
- Preparação do “pó prensado” para DRX, a amostra pulverizada é prensada manualmente com auxílio de um vidro sobre porta-amostra de alumínio. Nos casos de amostras com quantidade muito pequena, o pó é prensado sobre uma lâmina de vidro com auxílio de vaselina.



FIGURA 5 – Diferentes fases da preparação das amostras, para análises mineralógicas e químicas.

A análise multielementar por fluorescência de raios X é baseada na medida das intensidades dos raios X, emitidos pelos elementos químicos de uma amostra, quando devidamente excitados através de uma fonte de radiação gama (radiação X de elevada energia). Essa radiação causa uma mudança no nível de energia dos elétrons que passam a emitir radiação fluorescente, onde o espectro de energia correspondente a estas mudanças é único para cada tipo de elemento.

As análises químicas foram realizadas em equipamento PHILIPS, modelo PW 2400, a partir de amostras prensadas (FIGURA 5). A interpretação foi obtida através do *software SuperQ Manager*, da PHILIPS. O LAMIR desenvolveu um programa analítico quantitativo para rochas carbonáticas, denominado “Rocha Carbonática Prensa”, no qual são analisados por pastilha prensada, os 10 óxidos maiores e 04 elementos-traço (TABELA 4). É realizada também a perda ao fogo, ou LOI – *lost on ignition*, complementar à análise química, em amostra pulverizada.

TABELA 4 – ÓXIDOS E ELEMENTOS ANALISADOS NA LINHA ANALÍTICA CALCÁRIO PRENSA

CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	S	Sr	Cl	Ba
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(pm)

Os resultados das análises da CaO, MgO e de MnO foram divididos pelo seu fator de conversão (1,399; 1,658 e 1,291, respectivamente) para se obter o Ca, Mg e Mn elementares, de modo que se obtenham as razões Ca/Mg, Mn/Sr e Ca/Sr cujos valores em gráficos, refletem as condições primárias ou processos diagenéticos pelos quais a rocha passou; essas razões também são informações complementares à interpretação das razões isotópicas de Sr.

As amostras que não apresentaram fechamento em 100% no programa analítico quantitativo “Rocha Carbonática Prensa” foram reanalisadas e interpretadas no programa analítico semi-quantitativo, ou de varredura química, para verificar a presença de outros elementos químicos não detectados no programa analítico.

2.3 TÉCNICA DA DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A técnica de difração de raios X consiste na incidência de radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados. Em um material onde os átomos estejam arranjados de forma sistemática, como nas estruturas cristalinas, o fenômeno da difração de raios X ocorre nas direções de espalhamento que satisfazem a Lei de Bragg.

Admitindo-se que um feixe monocromático de determinado comprimento de onda (λ) incide sobre um cristal com o ângulo θ , ou ângulo de Bragg, tem-se: $n \lambda = 2d \sin \theta$, sendo que “ λ ” corresponde ao comprimento de onda da radiação incidente; “ n ” à ordem de difração; “ d ” à distância interplanar para o conjunto de planos hkl (índice de Miller) da estrutura cristalina e “ θ ” é o ângulo medido entre o feixe incidente e determinados planos do cristal.

O feixe difratado é expresso através de picos registrados num espectro de intensidade *versus* ângulo 2θ ou “ d ”, constituído o padrão difratométrico ou difratograma. As intensidades obtidas em ângulo 2θ correspondem a difração do feixe incidente por um determinado conjunto de planos do cristal, que possuem a mesma distância interplanar. Cada composto cristalino apresenta um padrão difratométrico característico, permitindo sua identificação através das posições angulares e intensidades relativas dos picos difratados.

A determinação mineralógica das amostras desse trabalho foi realizada utilizando-se um difratômetro PHILIPS, modelo PW 1830 (FIGURA 5), com ânodo de Cu (Cu $K\alpha_1 = 1,5406 \text{ \AA}$) e gerador de tensão e corrente ajustados para 40 kV e 30 mA, respectivamente. O ângulo de varredura foi de 3° a $70^\circ 2\theta$.

A interpretação dos difratogramas (FIGURA 6) com a porcentagem semi-quantitativa dos minerais é obtida pelo método de RIR (*Reference Intensity Ratio* – Razão das Intensidades de Interferência), utilizando-se o *software X`Pert HighScore*, da PHILIPS.

A porcentagem semiquantitativa obtida no *software* é posteriormente recalculada em 100% para se obter, mesmo que indiretamente, a quantidade equivalente do mineral na amostra e poder representá-la através de gráficos, por exemplo, sendo que esse procedimento é optativo e foi adotado. Por esse motivo, a análise de difração foi usada somente de maneira complementar às informações descritivas mesoscópicas e petrográficas, visando confirmar a existência ou não de minerais que já eram esperados ou que se tinha dúvida quanto à ocorrência. Como a quantidade dos minerais ou porcentagem foi obtida com certa margem de erro embutida (interpretação pessoal aliada às sugestões do *software*), não é absoluta, podendo apresentar variações.

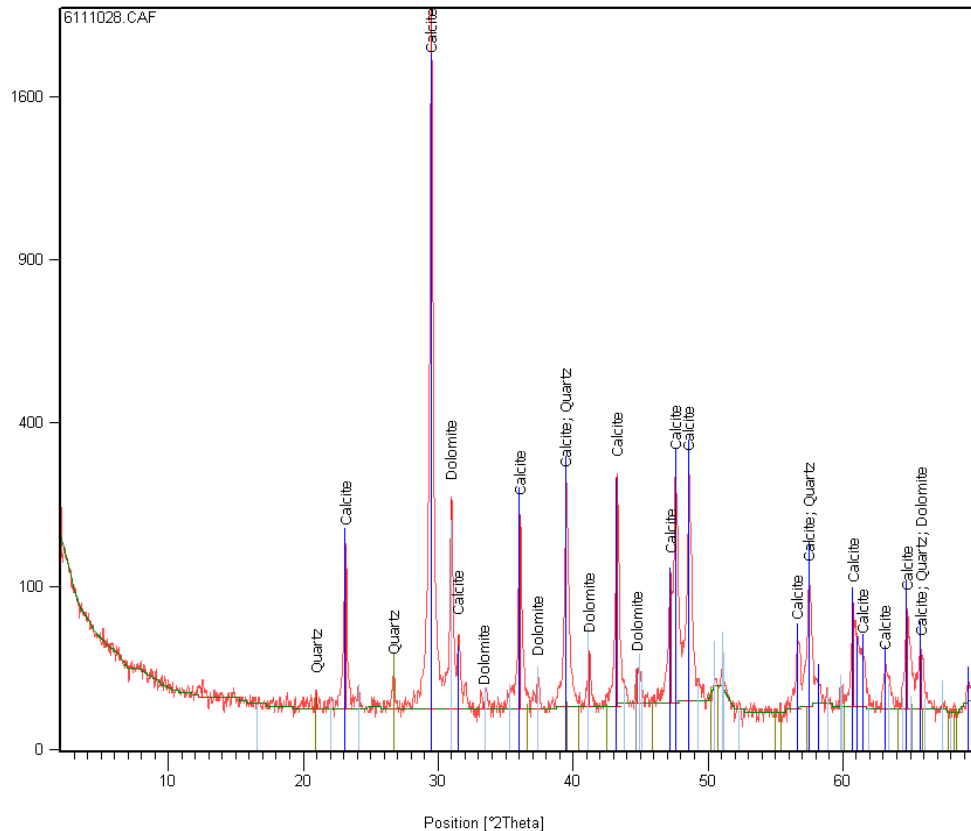


FIGURA 6 – Exemplo de difratograma de raios X obtido, com picos e minerais correspondentes.

2.4 TÉCNICA DA TERMOGRAVIMETRIA

A termogravimetria ou ATG/ADT para rochas carbonáticas, em atmosfera de CO_2 , é um método implantado no LAMIR que se baseia na análise direta da decomposição térmica dos carbonatos presentes na amostra, sendo essa decomposição avaliada via termogravimetria. Foi utilizada de maneira aliada à difração de raios X, para quantificação mineralógica necessária às análises isotópicas.

A temperatura de decomposição dos carbonatos em condições térmicas normais encontra-se na faixa de 750°C , sendo que na dolomita, ambos os óxidos são formados simultaneamente, traduzindo-se em uma única etapa de perda de massa (FIGURA 7A). Essas reações podem ser fortemente influenciadas pela presença de CO_2 na atmosfera circundante à amostra. Elevadas pressões parciais de CO_2 , traduzidas por uma atmosfera controlada de CO_2 , deslocam o equilíbrio

termodinâmico reacional de tal maneira que a formação do óxido de cálcio ocorrerá somente em temperaturas na faixa de 950°C (FIGURA 7 B), sem afetar a decomposição do carbonato de magnésio (GARDOLINSKI, 2008).

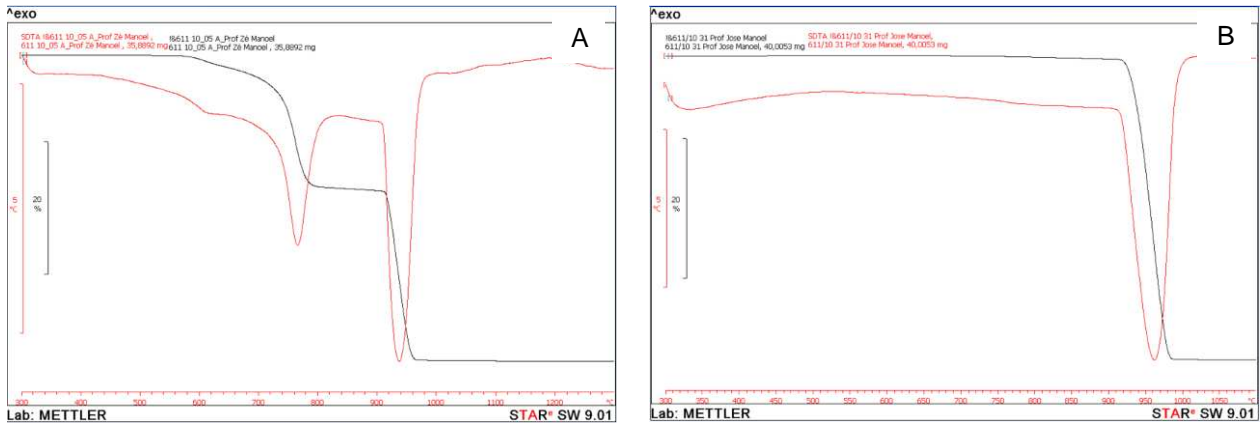


FIGURA 7 - Exemplos de gráficos obtidos para amostras de dolomita (A) e calcita (B), respectivamente.

Os carbonatos de cálcio (calcita) e magnésio (magnesita), assim como o carbonato duplo de cálcio e magnésio (dolomita) têm um comportamento térmico típico, semelhante ao dos carbonatos metálicos, passando por uma fase de decomposição do ânion com a formação do respectivo óxido e liberação de CO₂ gasoso (GARDOLINSKI, 2008).

Utilizando-se uma atmosfera de CO₂ durante o ensaio é possível então separar a formação dos óxidos de CaO e MgO em uma amostra de dolomita. Tomando-se por base esses resultados, é possível calcular o teor de dolomita presente na amostra pela etapa de formação de MgO. Da etapa de formação de CaO é possível inferir se há a presença de calcita na amostra e quantificá-la, já que se sabe qual a perda de massa correspondente à dolomita presente (GARDOLINSKI, 2008).

Uma das vantagens desse método é a alíquota de cerca de 30 miligramas de amostra, em comparação com métodos como DRX e FRX; mas se mostra problemático, podendo até se tornar impraticável em calcários argilosos, nos quais os filossilicatos perdem massa por desidroxilação, em temperaturas a partir de 500°C, interferindo na massa atribuída à decomposição do carbonato de magnésio (GARDOLINSKI, 2008). O equipamento utilizado é da Mettler Toledo, modelo ATG/ADT 851^e, acoplado a cilindros de gás nitrogênio, oxigênio e CO₂.

2.5 TÉCNICA DE ISÓTOPOS DE CARBONO E OXIGÊNIO

A análise da razão isotópica do carbono e oxigênio, realizada no LAMIR, é feita em relação ao padrão CO₂ calibrado internacionalmente. Os resultados são emitidos em relação ao padrão internacional PDB da Universidade de Chicago. O PDB refere-se a um fóssil particular de *belemnite* da Formação *Pee Dee* da Carolina do Sul. O desvio por mil, referido como $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$, é expresso pela relação (FAURE E MENSING, 1986, p. 573):

$$\delta^{13}\text{C} \text{ e } \delta^{18}\text{O} = \left[\left(\frac{\delta^{13}\text{C}}{\delta^{12}\text{C}} \text{ e } \frac{\delta^{18}\text{O}}{\delta^{16}\text{O}} \right) \text{ amostra} - \left(\frac{\delta^{13}\text{C}}{\delta^{12}\text{C}} \text{ e } \frac{\delta^{18}\text{O}}{\delta^{16}\text{O}} \right) \text{ padrão PDB} \right] \times 1000$$

A determinação das assinaturas isotópicas foram realizadas por meio de espectrômetro de fonte gasosa (IRMS – *Isotope Ratio Mass Spectrometry*) ao qual estão acoplados vários acessórios, que permitem a determinação das razões isotópicas de carbono e oxigênio. Devido à configuração do sistema, todas as determinações são realizadas *online* e com o auxílio de *autosampler*.

As análises foram realizadas por meio de um espectrômetro de massa da marca *Thermo Delta V Advantage*, acoplado a um *Gas Bench II*. Embora o sistema seja automatizado, cerca de 300 microgramas de cada amostra são colocados em recipiente de vidro (*vial*) com septo de silicone, que posteriormente passa por um processo de limpeza, visando eliminar gases atmosféricos e eventual excesso de umidade; esta limpeza é realizada por meio de um fluxo de He (*flush*). Posteriormente, é introduzido ácido fosfórico nos *vials* por meio de uma agulha a uma temperatura de 70°C. A reação do ácido com a amostra libera CO₂, que é analisado pelo espectrômetro de massa, definindo as razões de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

3.1 O CRÁTON SÃO FRANCISCO

A história de caracterização e delimitação do Cráton do São Francisco sintetiza-se em Alkmim, Brito-Neves e Alves (1993). O Cráton do São Francisco (FIGURA 8) representa um núcleo crustal estabilizado no Proterozóico Inferior e margeado por terrenos retrabalhados durante o Ciclo Brasileiro.

É delimitado pelas faixas brasileiras Brasília (a sul e oeste), Rio Preto (a noroeste), Riacho do Pontal e Sergipana (a norte) e Araçuaí (a sudeste). A leste, o cráton encontra a margem continental (bacias do Jequitinhonha, Almada, Camamu e Jacuípe). O seu interior é coberto por unidades pré-cambrianas e fanerozóicas e em duas áreas está exposto o embasamento, no extremo sul e a leste (ALMEIDA, 1977; ALMEIDA E HASUI, 1984; ALKMIM, 2004).

A composição do cráton compreende quatro unidades litoestratigráficas maiores: 1) Supergrupo Espinhaço, basicamente uma sucessão de terrígenos intercalados com vulcânicas e marinhos, metamorfisados – também denominado embasamento; 2) Supergrupo São Francisco, que compreende as coberturas proterozóicas e entre elas, o Grupo Macaúbas, glacio-continental e o Grupo Bambuí, marinho; 3) Coberturas fanerozóicas representadas pelos sedimentos paleozóicos do Grupo Santa Fé e 4) Grupo Areado, Grupo Mata da Corda e Grupo Urucuia, cretácicos.

As áreas de cobertura compreendem três grandes unidades morfotectônicas, a Bacia do São Francisco, o Aulacógeno do Parnamirim e uma grande parte do rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá. Além desses, outros domínios de cobertura são as bacias neoproterozóicas do Rio Pardo e da Faixa Sergipana (ALKMIM, 2004). Dentre os cinturões brasileiros, todos apresentam vergência tectônica em direção ao cráton.

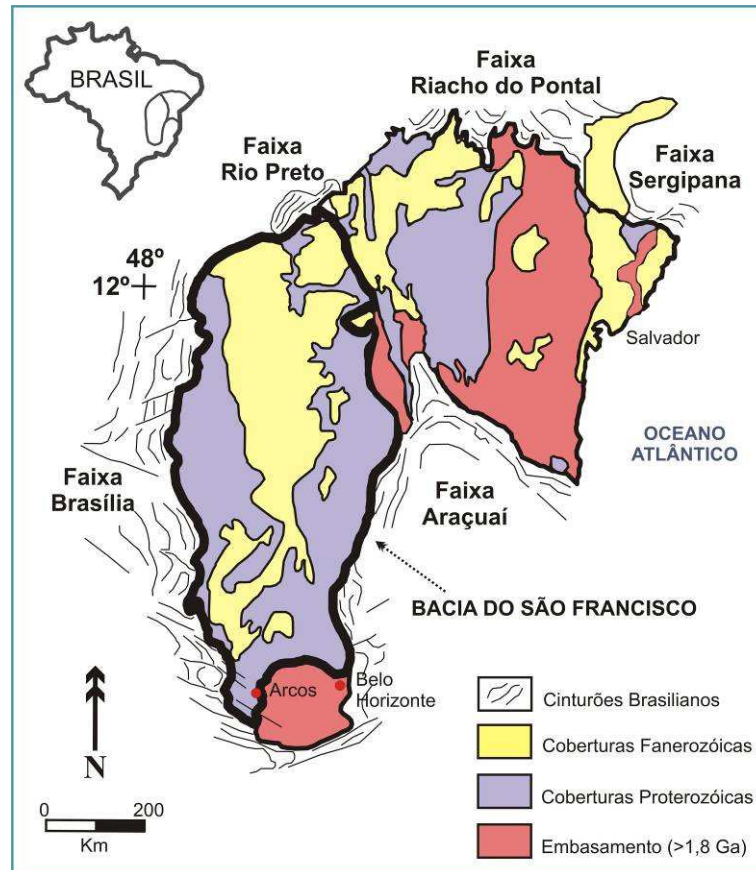


FIGURA 8 – Geologia no Cráton do São Francisco.
FONTE: Modificada de Martins-Neto e Pinto (2001).

Estruturalmente, o cráton pode ser dividido em dois domínios estruturais separados por um corredor de deformação vergente e polarizado (Domínios I, II e Corredor do Parnamirim, respectivamente). Em ambos os domínios as porções externas são compostas por coberturas proterozóicas deformadas e apenas em dois compartimentos, C1 e C2, na porção central do Domínio I (FIGURA 9), a cobertura fora poupada de uma deformação significativa (ALKMIM, BRITO-NEVES E ALVES, 1993).

No extremo sudoeste da bacia, o que ocorre são feixes de falhas transcorrentes sinistrais de direção N60°W, que sai da Faixa Brasília para além dos limites da bacia, afetando até o embasamento da porção sul do cráton (MARTINS-NETO E PINTO, 2001).

A Bacia do São Francisco, destacada na FIGURA 8, cobre uma área de mais de 300.000 km² da bacia hidrográfica homônima e estende-se pelos estados de Minas Gerais, Bahia, Mato Grosso e Goiás e geotectonicamente, está instalada na entidade maior do cráton homônimo (ALKMIM, 2004). Seus limites oeste, noroeste e

leste coincidem com os limites do cráton e o limite sul é de natureza erosiva (MARTINS-NETO E PINTO, 2001).

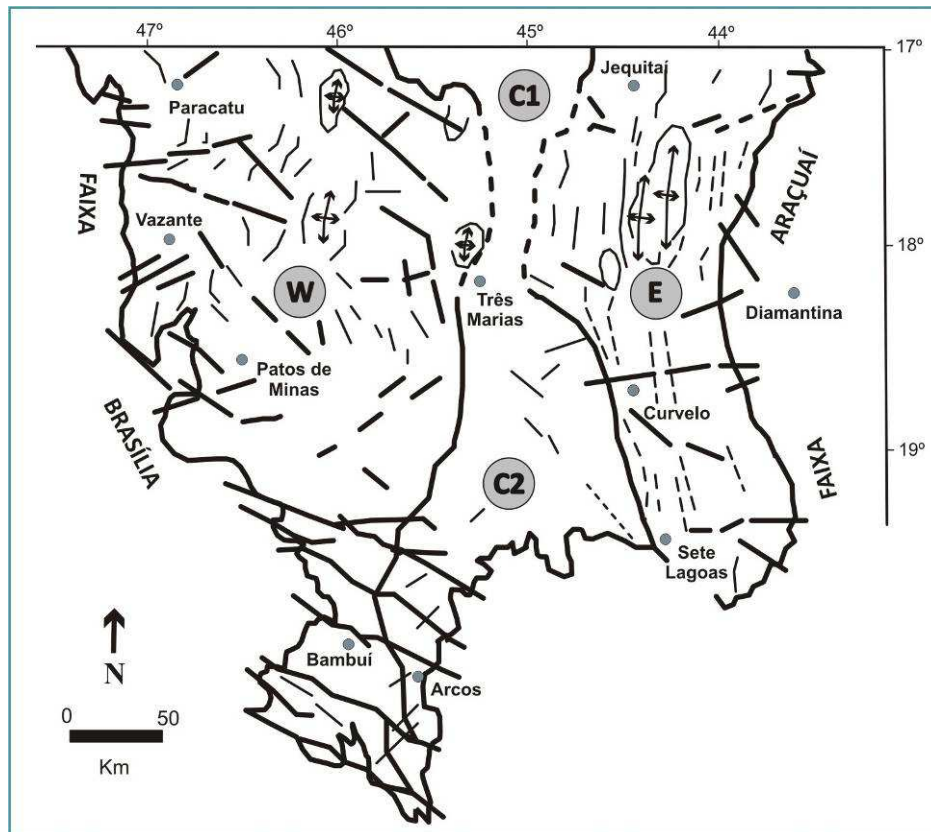


FIGURA 9 – Mapa estrutural simplificado da porção sul da bacia.
FONTE: Modificada de Martins-Neto e Pinto (2001).

Para alguns autores, Bacia do São Francisco denota a porção sul ou meridional do cráton, coberta por sedimentos de idades proterozóicas a fanerozóicas. Para outros, seria o *locus* da deposição dos sedimentos neoproterozóicos do Supergrupo São Francisco, implicando sua extensão para além dos limites do cráton. É consagrado, porém, o uso de “Bacia do São Francisco”, para a maioria dos autores, para o primeiro caso, de porção meridional delimitada em sua maioria, pelos limites do cráton.

Duas unidades distintas são reconhecidas na bacia, uma glaciogênica basal e outra superior composta por depósitos químicos, pelitos e siliciclásticos. Ela é considerada o registro do ciclo Rodínia – Gondwana, iniciado no final do Mesoproterozóico e concluído no início do Fanerozóico.

A estratigrafia das unidades que compõem a Bacia do São Francisco, bem como as unidades basais pré-BambuÍ, foram objetivo de publicação de inúmeros

trabalhos. Entre os clássicos para o Bambuí (FIGURA 10), estão as definições compiladas por Babinski (1993).

ESTRATIGRAFIA	Branco & Costa, 1961		Oliveira, 1967	Braun, 1968	Dardenne, 1978	Braun, 1988	
	Formações	Membros	Formações	Formações	Formações	Subgrupo	Formações
arenitos, arcóseos, siltitos	Paraopeba	Serra da Saudade	Três Marias	Três Marias	Três Marias	Paraopeba	Três Marias
siltitos, argilitos		Três Marias			Serra da Saudade		Serra da Saudade
calcários oolíticos, folhelhos, siltitos		Lagoa do Jacaré	Lagoa do Jacaré	Paraopeba	Lagoa do Jacaré		Lagoa do Jacaré
folhelhos, siltitos, lentes de calcário		Serra de Sta. Helena	Serra de Sta. Helena		Serra de Sta. Helena		Serra de Sta. Helena
dolomitos, calcários cinza, calcários argilosos	Sete Lagoas		Sete Lagoas	Paranoá fácies Carrancas	Sete Lagoas		Sete Lagoas
conglomerados, pelitos, arcóseos	Carrancas		Vila Chapada		Jequitaí (Gr. Macaúbas)		Samburá

FIGURA 10 – Quadro com as principais colunas estratigráficas propostas para o Grupo Bambuí.
FONTE: Modificada de Babinski (1993).

As unidades sotopostas ao Grupo Bambuí compreendem o embasamento, as unidades predominantemente continentais Espinhaço e Araí e as controversas unidades Paranoá e Macaúbas.

O embasamento constitui-se de gnaisses, granitos e rochas metamórficas de alto grau com idade superior a 1,8 Ga, conforme critério adotado em Martins-Neto e Pinto (2001). O Supergrupo Espinhaço compõe-se de rochas metassedimentares com feições tectônicas de rifte, inicialmente com deposição continental acompanhada de magmatismo durante a fase de subsidência mecânica, evoluindo para sedimentação marinha nos depósitos superiores (ZALÁN E ROMEIRO-SILVA, 2007).

O Grupo Macaúbas compõe a base do Grupo Bambuí e é composto essencialmente por depósitos glaciais, compõe-se de conglomerados (diamictitos e tilitos), quartzitos e filitos que registram uma glaciação continental do início do Neoproterozóico. Esses sedimentos possuem várias denominações: Formação Bebedouro, na Bahia; Formação Ibiá, no oeste de Minas Gerais; Formação Jequitaí, no leste de Goiás e oeste de Minas Gerais e Grupo Macaúbas, no leste de Minas Gerais (BABINSKI, 1993).

Babinski (1993) optou pela designação de Grupo Macaúbas para depósitos glaciogênicos que ocorrem no estado de Minas Gerais e Formação Bebedouro para os encontrados na Bahia. Lopes (1995) adota a estratigrafia proposta pelo Projeto RADAMBRASIL em 1982, usando o termo conglomerado basal, como uma das unidades do Subgrupo Paraopeba, compatíveis aos conglomerados Samburá, de Miranda, 1951, e Carrancas, de Branco e Costa, 1961.

O projeto RADAMBRASIL, 1982, formaliza as modificações na definição estratigráfica proposta em 1978 por Dardenne. Exclui a Formação Jequitáí da base do Grupo Bambuí, situando-a no Grupo Macaúbas (LOPES, 1995).

3.2 GRUPO BAMBUÍ

Convencionou-se que a sucessão litoestratigráfica, composta pelos Grupos Macaúbas e Bambuí, ou Formação Jequitáí e Grupo Bambuí (dependendo da classificação adotada), compõem o Supergrupo São Francisco. A denominação de supergrupo perdura até Martins-Neto e Pinto (2001). Em Zalán e Romeiro-Silva (2007), propõe-se a retirada da mesma, devido ao hiato deposicional – temporal e diferenças litológicas que, acreditam os autores, separam o Grupo Macaúbas do Grupo Bambuí.

Segundo Babinski (1993), que adota a denominação de supergrupo, o contato da unidade basal (Grupo Macaúbas) do Supergrupo São Francisco, com as unidades subjacentes que compõem o Supergrupo Espinhaço, é discordante. O contato entre os Grupos Macaúbas e Bambuí é controverso e já foi considerado por diversos autores como tectônico, interdigitado e um hiato.

O Grupo Bambuí é descrito de maneira geral como uma sucessão de rochas marinhas carbonáticas e pelíticas que, para as bordas e topo da bacia, passam a conglomerados e arenitos. De acordo com Alkmim *et al.* (1988), o Grupo Bambuí compreende uma espessura total entre 600 e 800 m de sedimentos carbonáticos alternados com pelitos e sobrepostos por pacotes sedimentares essencialmente arenosos.

Segundo Alkmim *et al.* (1988) a coluna estratigráfica inicialmente bem aceita e muito usada foi a proposta em 1961 por Branco e Costa. Assim como o Grupo Macaúbas, o Grupo Bambuí não se restringe exclusivamente à região da Bacia do São Francisco, propriamente dita, tomando parte na arquitetura das faixas de dobramento Brasília e Araçuai.

Na área cratônica interna ocorrem sedimentos predominantemente carbonáticos além de margas, folhelhos, siltitos e folhelhos sílticos. Na bacia (FIGURA 11) essas deposições são representadas pelas Formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade.

A unidade glaciogênica basal do Bambuí - para fins descritivos considerada Formação Jequitai - repousa em discordância sobre as unidades mais antigas e constitui-se de conglomerados com matriz siltico-argilosa que englobam seixos facetados de quartzitos, calcários, dolomitos, cherts, gnaisses, granitos, mica-xistos e rochas vulcânicas (DERBY, 1980, *In* ALMEIDA E HASUI, 1984).

Almeida e Hasui (1984) descrevem que há dúvidas se a Formação Sete Lagoas superpõe-se de maneira concordantemente sobre o tilito basal. É composta de uma sequência margosa e pelítica com lentes de dolomitos de variadas dimensões; essa sucessão característica é denominada de Formação Januária na Bahia. A seção-tipo da formação situa-se perto de Belo Horizonte.

A Formação Serra de Santa Helena é descrita como uma sucessão de pelitos, siltitos, argilitos, ardósias e folhelhos (BRANCO E COSTA, 1961, *In* LOPES, 1995). Zalán e Romeiro-Silva (2007) propõem que há na porção central da bacia, uma interdigitação da base para o topo dos pelitos da Formação Serra de Santa Helena com os carbonatos estromatolíticos escuros da Formação Sete Lagoas, seguidos por nova intercalação de pelitos da Formação Serra de Santa Helena.

A Formação Lagoa do Jacaré (BRANCO E COSTA, 1961, *In* ALMEIDA E HASUI, 1984) caracteriza-se por siltitos e margas nas quais se intercalam lentes de calcários pretos microcristalinos a cristalinos, ricos em matéria orgânica e fétidos, com numerosos níveis oolíticos e pisolíticos nos quais se notam freqüentes estratificações cruzadas.

A Formação Serra da Saudade é composta por siltitos, argilitos, folhelhos e lentes de calcário. A Formação Três Marias, unidade superior do Grupo Bambuí, é caracteristicamente composta por arcóseos e siltitos (ALMEIDA E HASUI, 1984, citando BRANCO E COSTA, 1961). A passagem dessa unidade para a inferior já foi descrita por autores como transicional, discordância regional e por falha; mais aceite, porém, é a de discordância erosiva, apoiado no fato de que há conglomerados descritos na base da Formação Três Marias (ALMEIDA E HASUI, 1984).

Para esse trabalho será considerada a evolução tectono-sedimentar ocorrida na deposição do Grupo Bambuí, considerada por Zalán e Romeiro-Silva, 2007, mostrada como detalhe da carta estratigráfica da bacia, na FIGURA 12. Propõem que ocorreu no Paleo-Mesoproterozóico uma sequência rifte representada pelo Supergrupo Espinhaço e Grupo Araí. A deposição do Espinhaço ocorreu durante a

Tafrogênese Estateriana (movimentos distensionais que levaram à desagregação do Supercontinente Atlântica, 1750-1500 Ma).

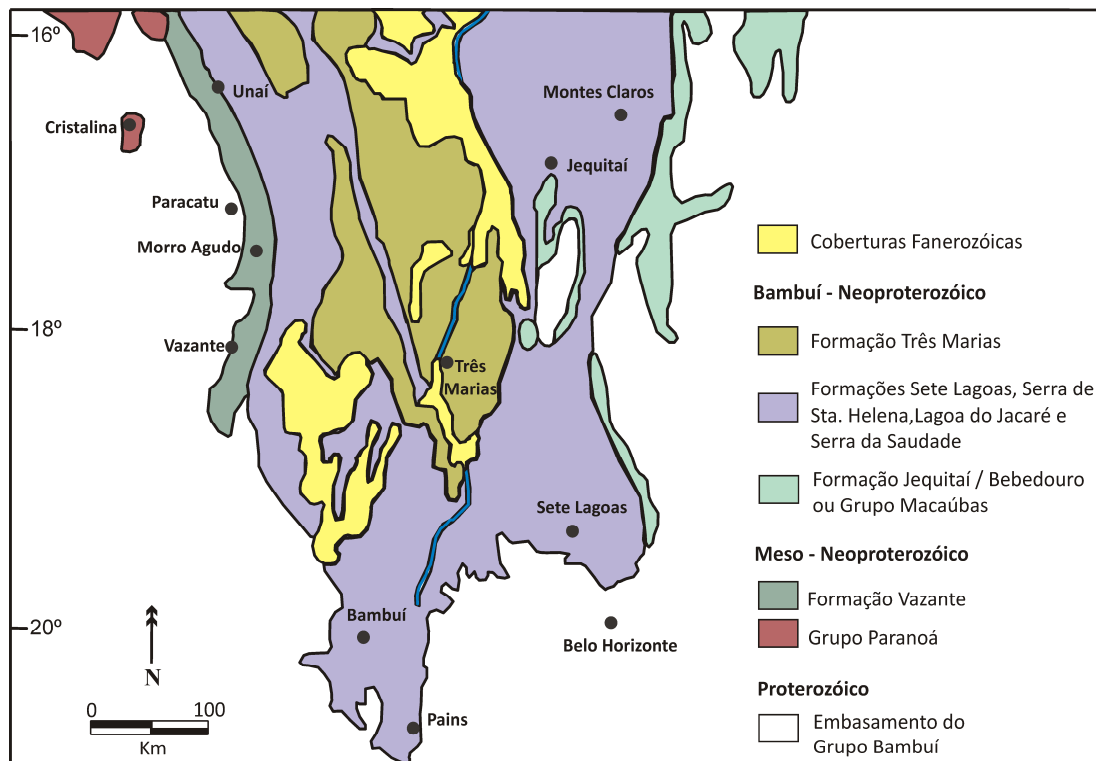


FIGURA 11 - Detalhe da geologia da bacia na porção sul.
FONTE: Modificada de Misi *et al.* (2007).

Ao final da deposição da Supersequência Rifte, seguem-se os movimentos orogenéticos indicadores da aglutinação (Colagem Orogênica Uruaçuana?) do Supercontinente Rodínia, em torno de 1.300-1.000 Ma (MARTINS-NETO E PINTO, 2001), levando à inversão total dos riftes estaterianos na atual região da Serra do Espinhaço, bem como a inversões de falhas normais no substrato da Bacia do São Francisco, visíveis em linhas sísmicas (ZALÁN E ROMEIRO-SILVA, 2007).

Rodínia começou a desmembrar-se entre 1.000 Ma e 950 Ma (Tafrogênese Toniana) iniciando-se, então, a deposição do Grupo Macaúbas, acompanhada de vulcanismo bimodal (930-912 Ma), sedimentação glacial e desenvolvimento de margem passiva (MARTINS-NETO E PINTO, 2001). O Grupo Macaúbas teve seu pleno desenvolvimento na borda leste do Cráton do São Francisco, além da atual Serra do Espinhaço, como uma sequência inicialmente rifte, seguida de intrusão de assoalho oceânico e que evoluiu para uma margem passiva. Diamictitos glaciais documentam a presença de glaciações durante a sua evolução.

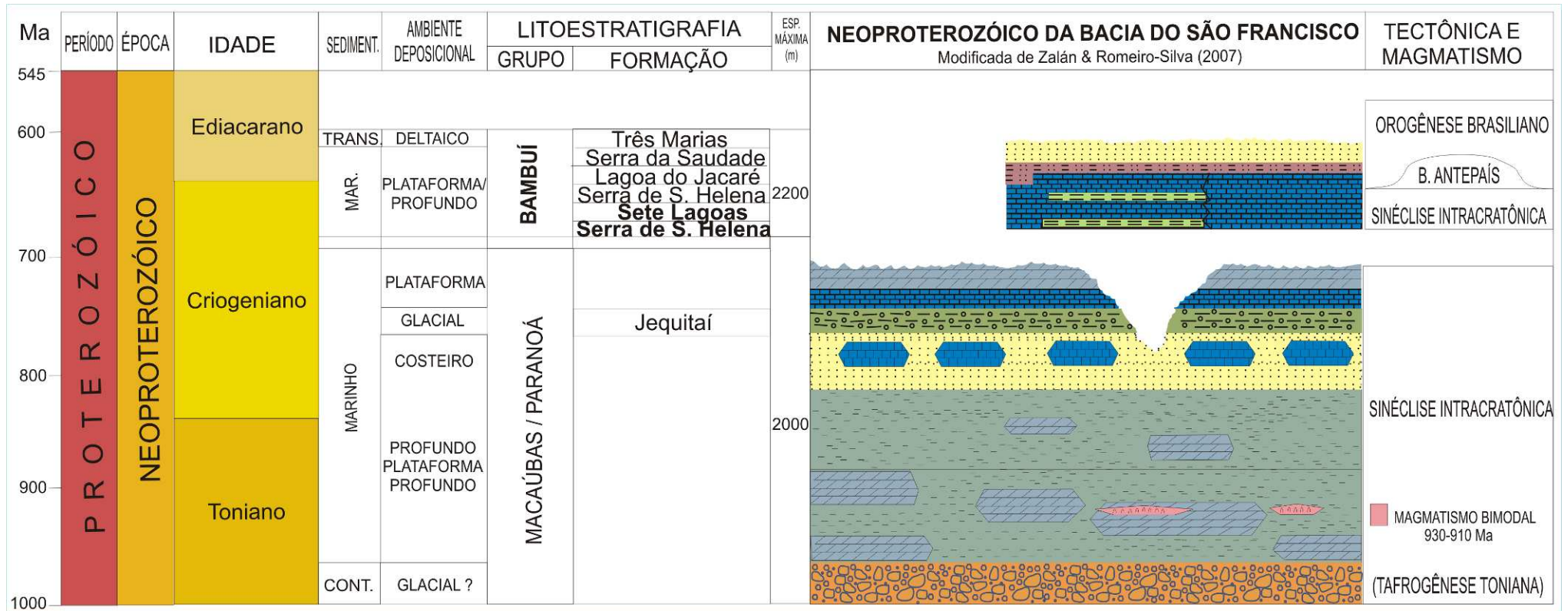


FIGURA 12 - Detalhe do Neoproterozóico na Carta Estratigráfica da Bacia do São Francisco.

FONTE: Modificada de Zalán e Romeiro-Silva (2007).

Amarrações sísmicas aliadas à re-interpretação dos perfis elétricos dos poços, bem como novas datações geocronológicas sofisticadas de seções-chave e correlações lito-bioestratigráficas (com base em estromatólitos) inéditas, forneceram um panorama dramaticamente diferente para as “clássicas” colunas da bacia. Foi constatado que, a grande discordância de primeira ordem que separa nas linhas sísmicas, a Supersequência Superior (Grupo Bambuí) da Intermediária (Grupos Macaúbas/Paranoá) localiza-se dentro da seção que, litoestratigraficamente, equivale à Formação Sete Lagoas (ZALÁN E ROMEIRO-SILVA, 2007).

A literatura contém um grande número de estimativas de idades para o Grupo Bambuí, todas associadas a uma grande margem de erro. Babinski, Schums e Chemale (1999) obtiveram idade Pb-Pb de 698 ± 69 Ma para calcários da Formação Sete Lagoas, na base da unidade. Posteriormente Babinski, Vieira e Trindade (2007) obtiveram idades, também de Pb-Pb, de 740 ± 22 Ma. De acordo com Kaufmann *et al.* (2001), os calcários Sete Lagoas possuem uma curva de isótopos de C, S, O e Sr similar à dos Maiberg *cap carbonates* da Namíbia e podem, com essa assinatura isotópica, ter sido depositados após um evento glacial global.

Martins (1999) mostra claramente um significativo desvio nos valores isotópicos dos carbonatos situados acima e abaixo desta profundidade. Tal desvio isotópico é de ampla natureza regional e separa claramente os carbonatos Paranoá/Macaúbas dos carbonatos Bambuí. O autor data esse hiato em 700-680 Ma, valores que passaram a ser considerados como indicativos das idades do topo da Supersequência Intracratônica e da base da sobrejacente Supersequência Intracratônica/Antepaís, respectivamente.

A idade dos diamictitos da Formação Jequitaí, situados logo abaixo desses carbonatos superiores dos Grupos Macaúbas/Paranoá, foi estimada como sendo de 760-745 Ma, representativos da Glaciação Sturtiana (variação de 773-713 Ma, HOFFMAN E SCHRAG, 2002) no Brasil. *Cap carbonates* situados logo acima dos tilitos foram datados em 740 ± 22 Ma (BABINSKI E KAUFMAN, 2003).

O início da sedimentação, da Formação Serra de Santa Helena até a Formação Lagoa do Jacaré, apresenta características de ambientes calmos, rasos, contínuos de baixo gradiente, típicos de bacias intracratônicas. A composição por material clástico grosseiro na Formação Serra da Saudade, com clímax na Formação Três Marias, pode ser indicativo de uma deposição molássica resultante da erosão das placas cavalgantes ascendentes nas bordas da bacia (Orogênese

Brasileira), portanto, essa fase final de deposição pode ser interpretada como sendo de uma bacia de antepaís, daí a denominação de Supersequência Intracratônica/Antepaís (ZALÁN E ROMEIRO-SILVA, 2007).

3.3 INTERESSE EXPLORATÓRIO NA BACIA DO SÃO FRANCISCO

O conhecimento do potencial petrolífero das bacias da América do Sul é um passo no sentido de se proverem recursos energéticos adequados ao desenvolvimento nacional, em complemento à atuação da PETROBRAS e da Eletrobrás. A América do Sul, inclusive a sua plataforma continental, tem uma área sedimentar de quase 9.000.000 km², sendo 5.000.000 km² *on shore* no Brasil (ALVES, 1989).

Na área brasileira (*op. cit.*) se distribui cerca de uma centena de bacias sedimentares (FIGURA 13) cujo potencial petrolífero é muito variável. Este potencial está ligado à evolução tectono-sedimentar das bacias, sendo maior onde a conjunção de eventos favoráveis deu origem a rochas-matriz de petróleo, a rochas-reservatório e armadilhas ou trapas de óleo e/ou gás.

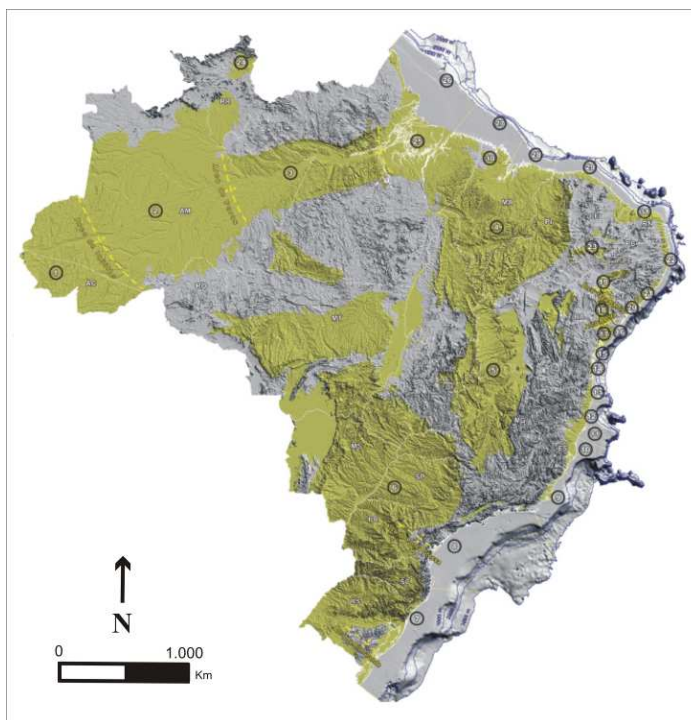


FIGURA 13 - Representação das bacias sedimentares brasileiras, em amarelo.
FONTE: Milani *et al.* (2007).

A exploração petrolífera na Bacia do São Francisco iniciou-se na segunda metade da década de 80, através de trabalhos da PETROBRAS englobando o mapeamento geológico e geoquímico, aquisição de linhas sísmicas regionais e perfuração de três poços exploratórios, em 1987. Na década de 1990, continuou-se com a aquisição sísmica 2D (em três campanhas, entre 1992 e 1997) e a perfuração de um poço exploratório em 1996. No momento, a PETROBRAS detém direitos exploratórios sobre seis blocos adquiridos à Agência Nacional do Petróleo (ANP) em 2005 (ZALÁN E ROMEIRO-SILVA, 2007).

Em Minas Gerais atualmente há 42 blocos em concessão para pesquisa (FIGURA 14A e 14B), ocupando uma área de aproximadamente 97 mil km². Os trabalhos de prospecção estão sendo realizados pelas operadoras dos blocos; entre as empresas vencedoras do bloco de licitações (7^a rodada da ANP, em 2005), além da PETROBRAS, estão a Oil M & S, que possui 22 blocos; a Abaris, com 03 blocos; a Orteng, com 01 bloco e a Cisco Oil & Gas, com 01 bloco.

Na décima rodada de licitações, em 2008, foram concedidos mais 09 blocos cujas empresas vencedoras foram a Shell, com 05 blocos, a Orteng, com 02 blocos e a Comp, também com 02 blocos. Na Bahia, a Bacia do São Francisco ainda não possui blocos concedidos.

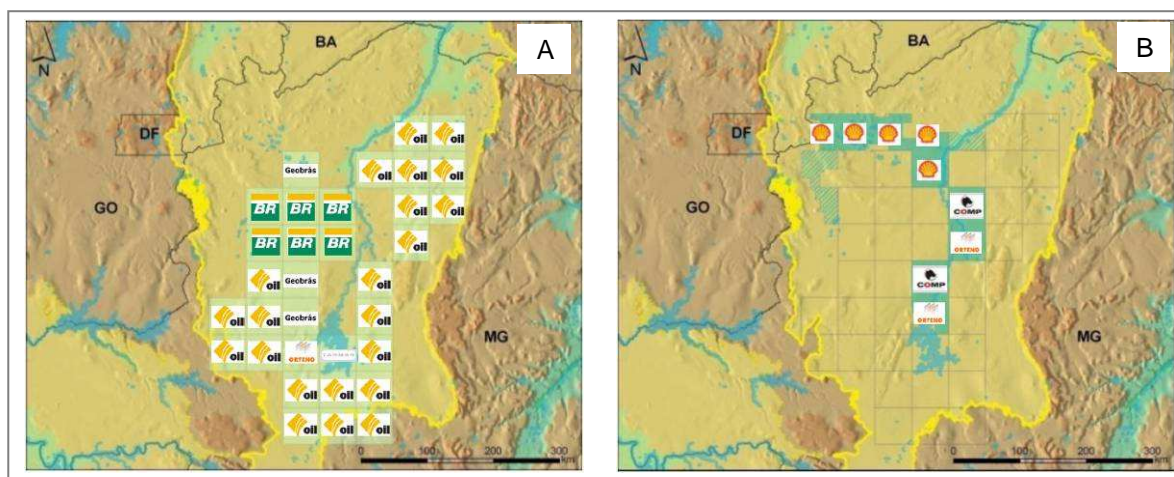


FIGURA 14 – (A) Blocos concedidos nas rodadas de licitações da ANP de 2005 e (B) blocos concedidos em 2008.

FONTE: Agência Nacional do Petróleo.

Os estudos e esforços exploratórios na Bacia do São Francisco justificam-se uma vez que são conhecidas pelo mundo, bacias proterozóicas com importante produção de hidrocarbonetos. Na Bacia do São Francisco, inúmeros indícios de

exsudações naturais de hidrocarbonetos foram observados nas perfurações de poços em Minas Gerais, Goiás e Bahia (FIGURA 15).

Nos poços para água, em Montalvânia, MG (poço 1 – vide FIGURA 15), na Fazenda São João da Barra há várias ocorrências de gás em poços para água com até 150 m. Em Alvorada do Norte, GO (poço 2), na Fazenda Cerejeira há um poço com ocorrências de gás a 92 m. Em Buritizeiro, MG (poço 3), vários poços rasos para água têm indícios de gás a até 100 m. Em Santana, BA (poço 4), na Fazenda Ludovico um poço constatou gás a 130 m, com chamas de até 10 m que perduraram por várias horas.

As exsudações naturais de gás e óleo (*op. cit.*) ocorrem em Buritizeiro, MG (número 5), no Remanso do Fogo próximo à vila de Cachoeira da Manteiga, na confluência dos Rios Paracatu e São Francisco, na forma de um *seep* natural em rios e lagos. Em Morada Nova de Minas, MG (número 6), no Rio Indaiá, ao sul da Represa Três Marias, um *seep* natural ocorreu em cratera, que queimou por dois meses, além de várias outras ocorrências no rio. Em Paracatu, MG (número 7), na Mina Bento Carmelo ocorre um *seep* natural de coque na mineração de zinco.

Quanto ao sistema petrolífero, tem-se que as rochas geradoras da bacia são do Grupo Paranoá e Macaúbas, com teores médios de COT de 3%. As rochas reservatório primárias são as siliciclásticas grosseiras dos Grupos Paranoá e Macaúbas e carbonatos do Grupo Bambuí; como reservatórios secundários tem-se as rochas do Conglomerado Samburá, reservatórios arenosos da Megassequência Espinhaço e arenitos cretácicos. É comum observar que reservatórios fraturados dolomitizados correspondem a baixas porosidades (Agência Nacional do Petróleo).

Porosidade secundária, porém (*op. cit.*), é observada em carbonatos do Grupo Bambuí com fraturamento subhorizontal associados a *vugs* e carbonatos do Bambuí dolomitizados, nos quais ocorrem substituição preferencial em oólitos e intraclastos. Como rochas selantes tem-se os folhelhos da Formação Serra da Saudade e Serra de Santa Helena, folhelhos intraformacionais e pelitos distais de unidades cretácicas. Nas porções deformadas do Bambuí, podem se constituir trapas anticlinais.

A migração de hidrocarbonetos pode ter ocorrido de várias maneiras, diretamente em função das relações estratigráficas, através de meios permoporosos, discordâncias regionais, falhas ou fraturamento intenso sobre camadas dúcteis. O *timing* de geração se deu, nos Grupos Paranoá e Macaúbas,

possivelmente durante a sedimentação Bambuí e, posteriormente na Formação Sete Lagoas, durante a deposição das unidades sobrepostas; o pico de geração teria ocorrido no Ciclo Brasileiro (ANP).

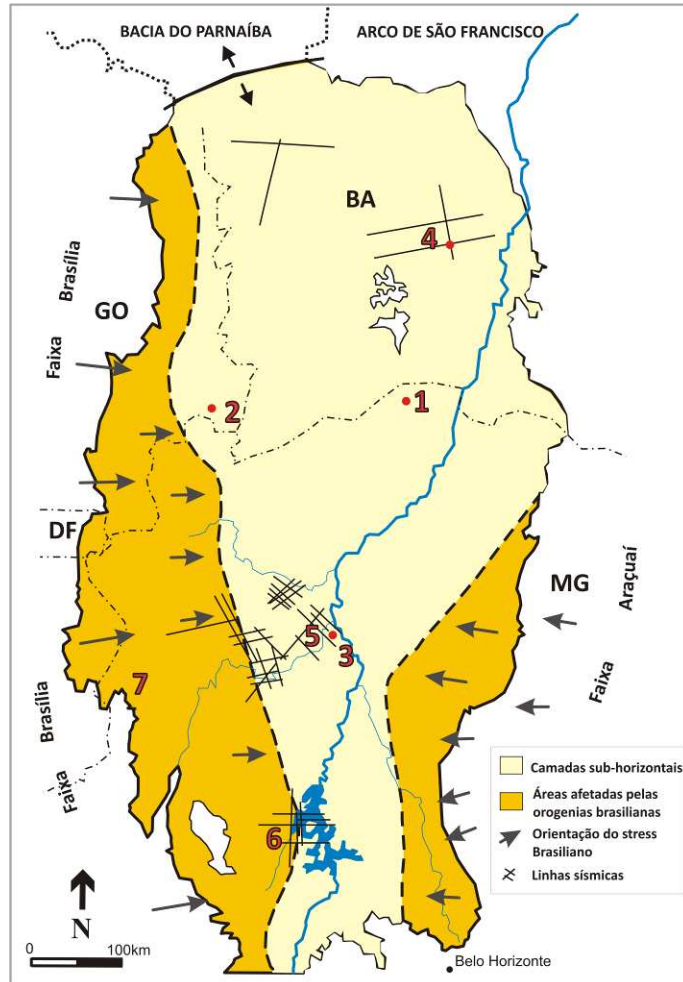


FIGURA 15 - Localização de poços perfurados com gás e exsudações ao longo da bacia.
FONTE: Modificada de ANP.

Dados da PETROBRAS para a Bacia do São Francisco indicam que a rocha geradora seriam os folhelhos da Formação Vazante, com teores de COT entre 4 e - 6‰; os reservatórios seriam dolomitos e calcários fraturados do Grupo Bambuí; a rocha selante são os folhelhos e carbonatos argilosos do Grupo Bambuí. A geração teria ocorrido através de subsidências da bacia e a migração e sistemas de armadilhas associam-se ao tectonismo com anticlinais compressionais da Orogênese Brasileira.

3.4 QUIMIOESTRATIGRAFIA NA FORMAÇÃO SETE LAGOAS

Nos últimos anos a teoria, aplicação e métodos em estratigrafia isotópica, principalmente em relação à variação da composição de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ da água do mar, ao longo do registro estratigráfico do Fanerozóico (essencialmente a partir de carbonatos), tem se desenvolvido consideravelmente. Por outro lado, conforme foi bem salientado por Knoll e Walter (1992), o preconceito que era comum há tempos atrás que os carbonatos proterozóicos são quase invariavelmente alterados, não tem mais sentido. Isso faz com que a quimioestratigrafia isotópica venha sendo aplicada com êxito no Proterozóico, suprimindo a frequente ausência de registros fossilíferos (MISI, 2001).

Os isótopos de Sr são geralmente usados em associação com isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$), cujas determinações analíticas devem ser preferencialmente realizadas nas mesmas amostras. A variação de $\delta^{13}\text{C}$ na água do mar reflete os efeitos de diversos fracionamentos isotópicos entre os reservatórios de carbono da Terra. A razão isotópica de O ($\delta^{18}\text{O}$) normalmente é usada em conjunto com o $\delta^{13}\text{C}$, para interpretação e identificação de ambientes diagenéticos e determinação aproximada das temperaturas do ambiente (Misi, 2001).

Iyer *et al.* (1995) demonstram que no Grupo Bambuí, razões altas de $\delta^{13}\text{C}$ e de carbono orgânico são encontradas em seções estratigraficamente acima daquelas com valores mais baixos, e que tal *trend* de valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ dos carbonatos basais é comum em muitos carbonatos neoproterozóicos pós-glaciais. Sugerem que a Formação Sete Lagoas foi depositada logo após o evento glacial Macaúbas. Outra característica incomum nos carbonatos dessa Formação são os altos valores de $\delta^{13}\text{C}$, tanto para os carbonatos, quanto para o carbono orgânico total (COT).

Kaufman e Knoll (1995) observam que o metabolismo microbial, como respiração, fermentação, metanogênese ou sulfato redução, é responsável por produtos de composição isotópica distinta e parece ser o principal processo de alteração da composição isotópica do carbono em carbonatos proterozóicos. Mesmo assim, seus efeitos são amenizados na diagênese, pela cimentação precoce dos espaços porosos e pela baixa proporção entre o carbono orgânico e o carbono do carbonato.

As rochas carbonáticas da base do Grupo Bambuí foram especialmente estudadas quanto às variações isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$. Alguns trabalhos regionais com faciologias e características litológicas e geoquímicas semelhantes às descritas na Mineração Bocaina, como Vieira (2007), Kuchembecker (2011) e Martins (1999), tiveram seus dados discutidos com detalhe no Capítulo 6. Outros trabalhos ainda serviram para comparações de dados obtidos ao longo da pesquisa, como Misi *et al.* (2007), Santos *et al.* (2004) e Santos *et al.* (2000).

Martins (1999) utilizou empregou a estratigrafia de sequências nas seções descritas em afloramentos e em testemunhos de sondagens, com integração de inúmeros dados e técnicas analíticas, de áreas sedimentares proterozóicas da Faixa de Dobramentos Brasília e parte das coberturas neoproterozóicas não deformadas, adjacentes ao Cráton do São Francisco.

Santos *et al.* (2004) estudaram carbonatos da Formação Sete Lagoas, ou porção basal do Grupo Bambuí, com amostragens em diferentes seções nos Municípios de Ataca Cachorro, Jequitai e Serra do Cabral.

Vieira (2007) teve como alvo de estudo a sedimentação pós-glacial neoproterozóica nas rochas da Formação Sete Lagoas. Levantou seções estratigráficas na área-tipo da formação, em pedreiras e em corte de estrada e obteve nas mesmas, um detalhamento principalmente isotópico e de paleomagnetismo.

Caxito *et al.* (2010) defendem que a quimioestratigrafia de sequências carbonáticas é uma ferramenta alternativa promissora para correlações globais e regionais, bem como para a comprovação de idades relativas. Estudaram camadas de diamictito (Formação Jequitai e unidades correlatas) basais do Grupo Bambuí ao longo do Cráton do São Francisco, sotopostos às sequências consideradas carbonatos de capa e propõem, através das características litológicas, isotópicas ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ e U-Pb em zircões) e comparações regionais, a idade Ediacarana Inferior, posterior à glaciação Marinoana, para as sequências carbonáticas da Formação Sete Lagoas.

Kuchembecker (2011) pesquisou enfocando as rochas da porção basal do Grupo Bambuí, debatendo temas como o registro das mudanças climáticas globais do Neoproterozóico, a idade e o contexto geotectônico da “Bacia Bambuí”, e a quimioestratigrafia das sucessões carbonáticas, visando correlações regionais.

4 ESTRATIGRAFIA DA MINERAÇÃO BOCAINA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS LITOTIPOS EXPLORADOS NA MINERAÇÃO

A Mineração Bocaina possui minério de excelente qualidade e seu calcário é considerado um dos melhores do país para fins metalúrgicos. A exploração da matéria-prima se dá através de bancadas com espessuras variáveis (cerca de 10 m) e tem início aproximadamente na altitude ou “cota” de 800 m (FIGURA 16), sendo a espessura total de aproximadamente 120 m de material retirado, alcançando na base um nível com excesso de sílica, que não é atualmente aproveitável pela empresa.



FIGURA 16 - Visão panorâmica na cota mais elevada (800 m de altitude), para o sentido noroeste da mineração.

Na mineração a abertura e progressão de frentes de lavra é controlada através de análises químicas realizadas pela própria mineração (fluorescência de

raios X), sem a preocupação explícita com as características faciológicas dos litotipos ou detalhes geoquímicos.

Atualmente o perfil litológico utilizado pela empresa é estabelecido com base na breve caracterização litológica e na aplicação industrial do material, a partir da cota ou altitude na qual ocorre. As associações dos litotipos com composições químicas semelhantes, utilizadas na empresa (como “silicoso de topo” e “magnesiano”, por exemplo), foram denominadas aqui “Intervalos”, para melhor descrição dos mesmos, visando evitar confusões de nomenclaturas.

Os intervalos foram caracterizados em fácies sedimentares, descritas em escala mesoscópica, de testemunho de sondagem e petrográfica. Essa relação entre os intervalos utilizados na exploração e as fácies pode ser verificada na FIGURA 17. As amostras descritas petrograficamente e sua disposição em profundidade constam na TABELA 2.2, no Capítulo 2.

Resumidamente, a geologia consiste de níveis dolomíticos no topo da mineração, representados por dolarenitos e dololutitos com estruturas estromatolíticas que, a partir de 20 m de profundidade gradam para composição calcítica. Passam a ocorrer calcarenitos e calcilutitos intercalados, com brechas sedimentares freqüentes por volta de 40 m de profundidade.

A partir de 60 m de profundidade, laminações escuras e carbonosas passam a ser freqüentes no calcário, lembrando ritmitos. Por volta de 100 m de profundidade passam a ocorrer margas de maneira gradacional. No nível inferior, as margas se intercalam com camadas centimétricas carbonosas pretas semelhantes a folhelhos, com ocorrências de piratas. Com aproximadamente 150 m de profundidade ocorre abruptamente um diamictito, que também faz contatos abruptos com um calcário impuro e em seguida, rochas xistosas.

Observa-se ao longo da seção, fraturamento, preenchimento de cavidades posteriores e recristalização em profundidades diversas, com padrões semelhantes. Nas frentes de lavra da mineração esse preenchimento é evidenciado principalmente em locais com estromatólitos, pois as estruturas laminadas heterogêneas parecem ser preferenciais à recristalização.

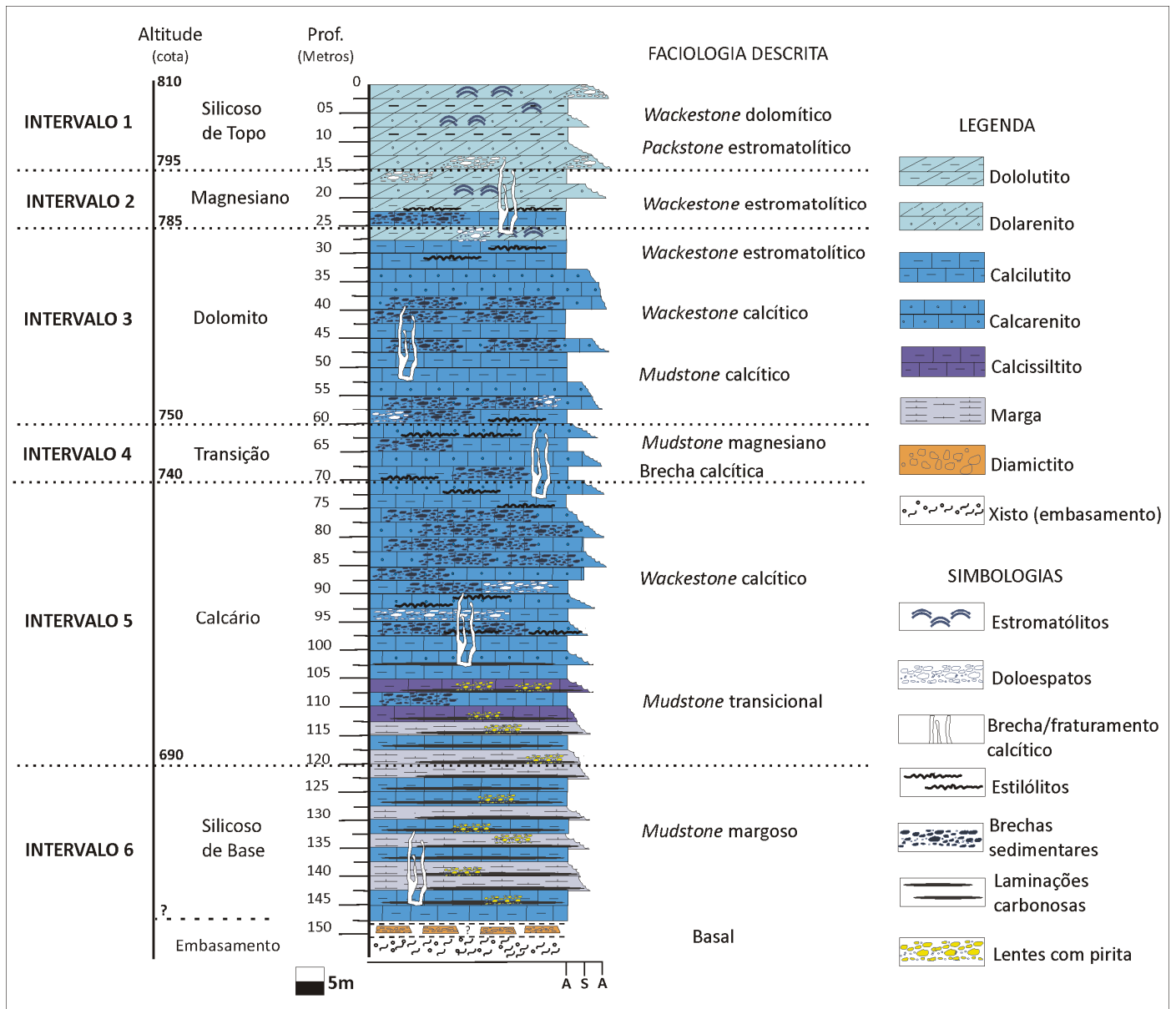


FIGURA 17 – Seção litológica com a relação entre os intervalos estratigráficos adotados para exploração na Bocaina e suas diferentes fácies detalhadas.
FONTE: O autor (2011).

4.2 FACIOLOGIA DO INTERVALO 1

O Intervalo 1, em detalhe na FIGURA 18, é o intervalo denominado “silicoso de topo” pela mineração e é composto por uma gradação que ocorre repetidamente, da fácies *wackestone* para fácies estromatolítica, claramente exposta nas frentes de lavra (FIGURA 19). Nas amostras de testemunho foi possível observar uma variação na fácies *wackestone* com características brechóides (clastos angulosos a semi-

arredondados da rocha original, cimentados) e com fraturamento da rocha original. Foram descritas duas lâminas petrográficas das fácies *wackestone*, uma da variação brecha dolomítica e outra da porção estromatolítica.

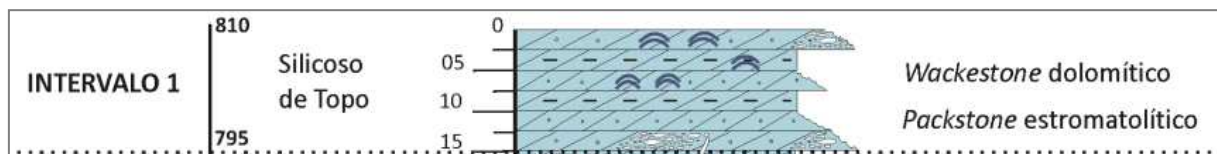


FIGURA 18 – Detalhe do intervalo 1, com a denominação utilizada na mineração e as fácies encontradas.

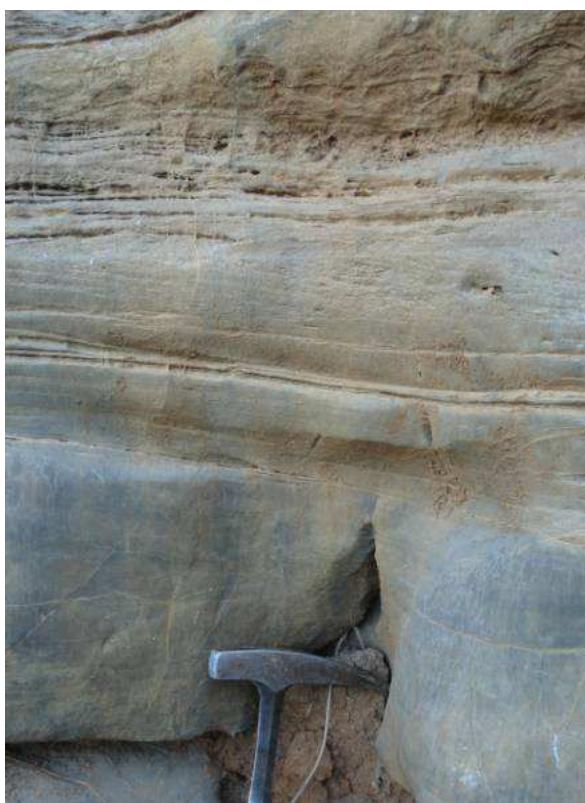


FIGURA 19 – Gradação das fácies *wackestone* maciça à estratificada (na base) e início da fácies estromatolítica (no topo); próximo à bancada com 800 m de altitude.

4.2.1 Fácies *Wackestone* Dolomítico

A fácies *wackestone* dolomítico é observada na frente de lavra, com aproximadamente 2 m de espessura, composta por gradação de dolomito microcristalino cinza predominantemente maciço a estratificado em laminações plano-paralelas (FIGURA 20A). A porção estratificada corresponde à laminações de *wackestone* microcristalino com laminações de espessura desde milimétricas a até 1 cm.

No testemunho de sondagem, foi possível verificar a variação dessa fácies com fraturamento e presença de brechas. Mesoscopicamente, a rocha apresenta preenchimento das fraturas por dolomita branca espática, com incipiente formação de clastos cinza angulosos, em meio à dolomita, conforme indicado nas flechas brancas da FIGURA 20B e 20C. Há ainda, ocasional porosidade submilimétrica no carbonato encaixante, indicada pela seta vermelha na FIGURA 20C.

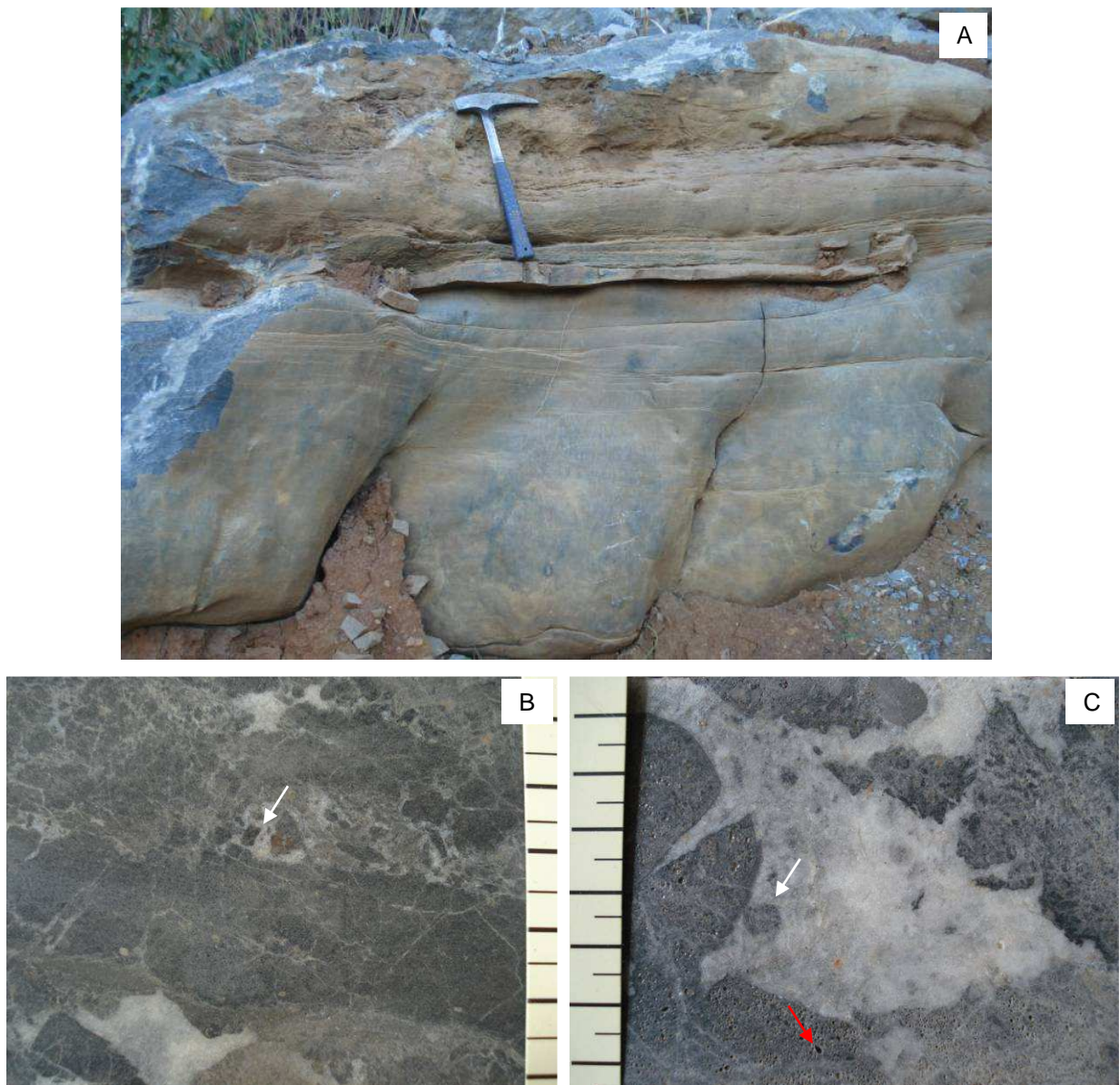


FIGURA 20 – (A) Gradação de *wackestone* microcristalino maciço a estratificado, da base para o topo, respectivamente; (B) brecha dolomítica com formação de clastos centimétricos; (C) microporosidade. As flechas brancas indicam os clastos angulosos e a vermelha, a microporosidade; em B e C a escala é centimétrica.

Descrição Petrográfica

○ *Amostra de wackestone F138B*

Composta de níveis micríticos e níveis com predomínio de oóides e intraclastos (FIGURA 21A). É possível observar a preservação de “fantasmas” dos oóides ou contorno, sem estruturas internas regulares visíveis. Ocorre também no interior dos oóides granulação maior, se comparada ao cimento, mas ainda uma lama carbonática e ocasionalmente quartzo.

Ocorre aproximadamente 5% de cristais de quartzo de aspecto sujo, dispersos na matriz micrítica. Há locais em que se formam espaços vazios, ocasionalmente com cristais de quartzo (FIGURA 21B). A rocha pode ser denominada *wackestone* (mais de 10% de grãos – oóides), ou ainda, um oomicrito (>25% de oóides).

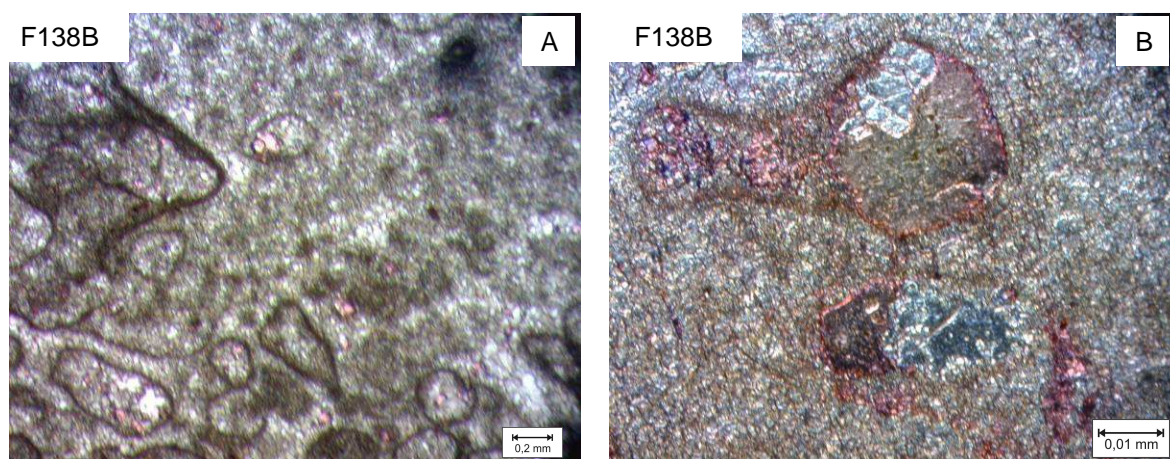


FIGURA 21 – (A) Nível micrítico e nível com oóides e intraclastos cristalizados, sob nicóis paralelos; (B) intraclasto com quartzo límpido, junto a espaços vazios circulares, sob nicóis paralelos.

○ *Amostra de wackestone TA02A*

Essa amostra foi retirada na frente de lavra em bancada de aproximadamente 800 m de altitude. Mesoscopicamente, a rocha possui laminações cinza-claro a escuro, essa intercalação se deve à diferença granulométrica. Petrograficamente, há cristais anédricos de dolomita em contatos irregulares, “crescidos”, abruptamente ao lado do cimento dolomítico com granulação mais fina (FIGURA 22).

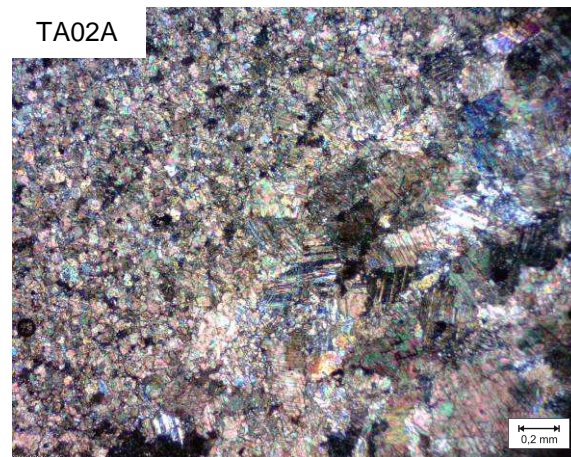


FIGURA 22 – Diferentes granulações em contato praticamente abrupto, sob nicóis cruzados.

○ *Amostra de wackestone brechado F6 03*

Microscopicamente, a porosidade observada na FIGURA 20C revela-se como móldica, desenvolvidas no interior de aproximadamente 90% de oólitos reliquias (FIGURA 23A).

Desenvolve-se também dolomita em algumas porções como cimento espático (FIGURA 23B), posterior à matriz micrítica, em agregados subédricos de cristais de aspecto sujo. As fraturas são preenchidas por dolomita incolor com calcita anédrica, subordinada.

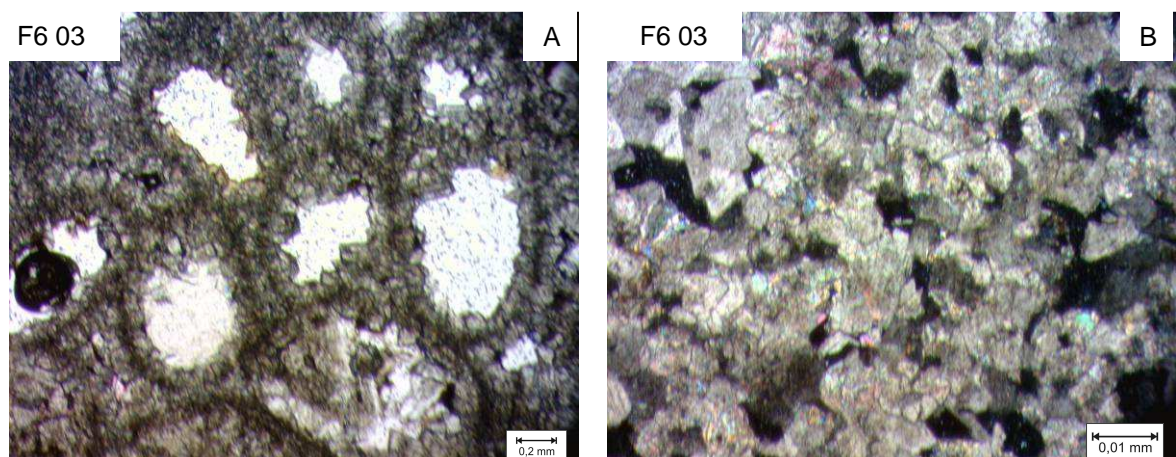


FIGURA 4.8 – (A) espaços vazios centrais dos oólitos reliquias, sob nicóis paralelos; (B) cimento espático dolomítico, sob nicóis cruzados.

4.2.2 Fácies *Packstone* Estromatolítica

A fácies *packstone* estromatolítica ocorre na maior altitude (aproximadamente 800 m). Nas frentes de lavra, é possível observar diversas

estruturas formadas por laminações milimétricas. Há camadas estromatolíticas sem perturbação, nas quais é possível observar um crescimento arborescente (FIGURA 24A) ou estrutura côncava e camadas nas quais eles ocorrem caoticamente sem orientação padrão, sugerindo ambiente de alta energia (FIGURA 24B).

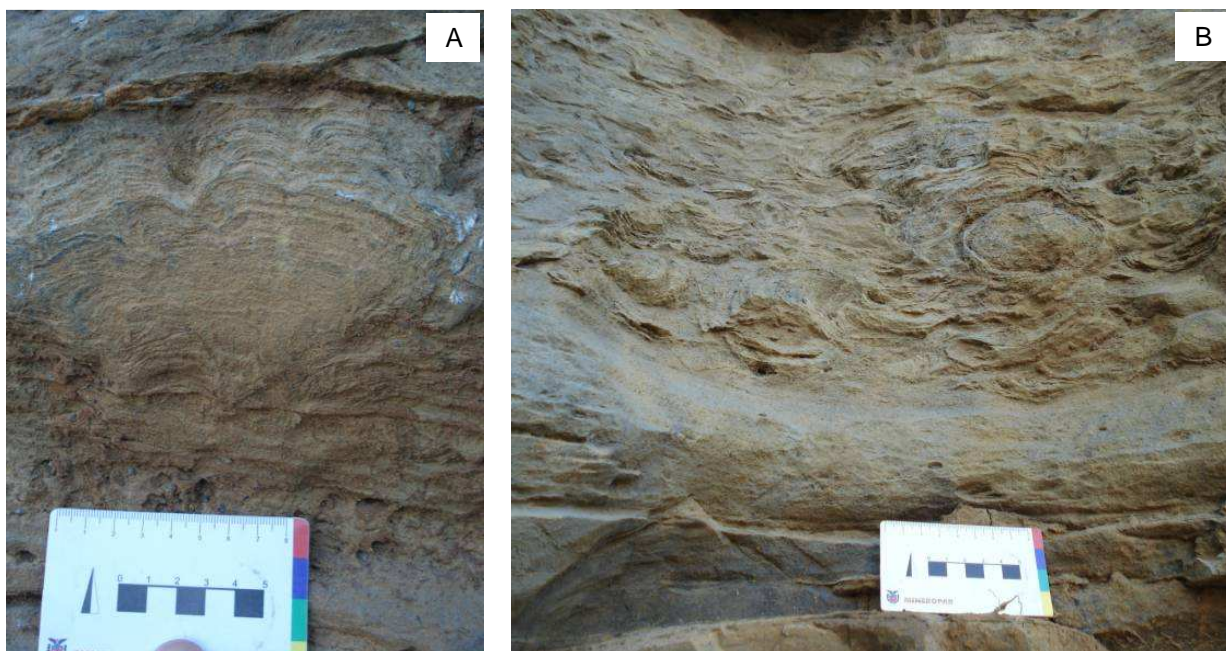


FIGURA 24 – (A) Fácies *packstone* com estromatólitos sem perturbação; (B) com estromatólitos apresentando padrão caótico. Em A e B a escala é centimétrica.

Na bancada superior da mineração, observa-se em planta, marcas onduladas e de dissolução cárstica, com formação de grutas na direção N05E. As dissoluções na rocha atingem aproximadamente 3 m horizontais e, verticalmente, 10 m. O calcário é estratificado com laminações plano-paralelas alternando níveis de diferentes granulometrias, desde microcristalinas a 2 mm.

Há ainda algumas estruturas observadas que podem, talvez, se tratar de estruturas de exposição subaérea, lembrando ressecamento (FIGURA 25A) e pingos de chuva, em média com 0,5 cm de diâmetro (FIGURA 25B).

Em amostras de testemunho de sondagem foi possível verificar uma variação dessa fácies; localmente ocorrem cristais de dolomita subédrica branca ou doloespatos, com tamanhos desde 5 mm a 1 cm, em meio às laminações microbiais (FIGURA 25C).

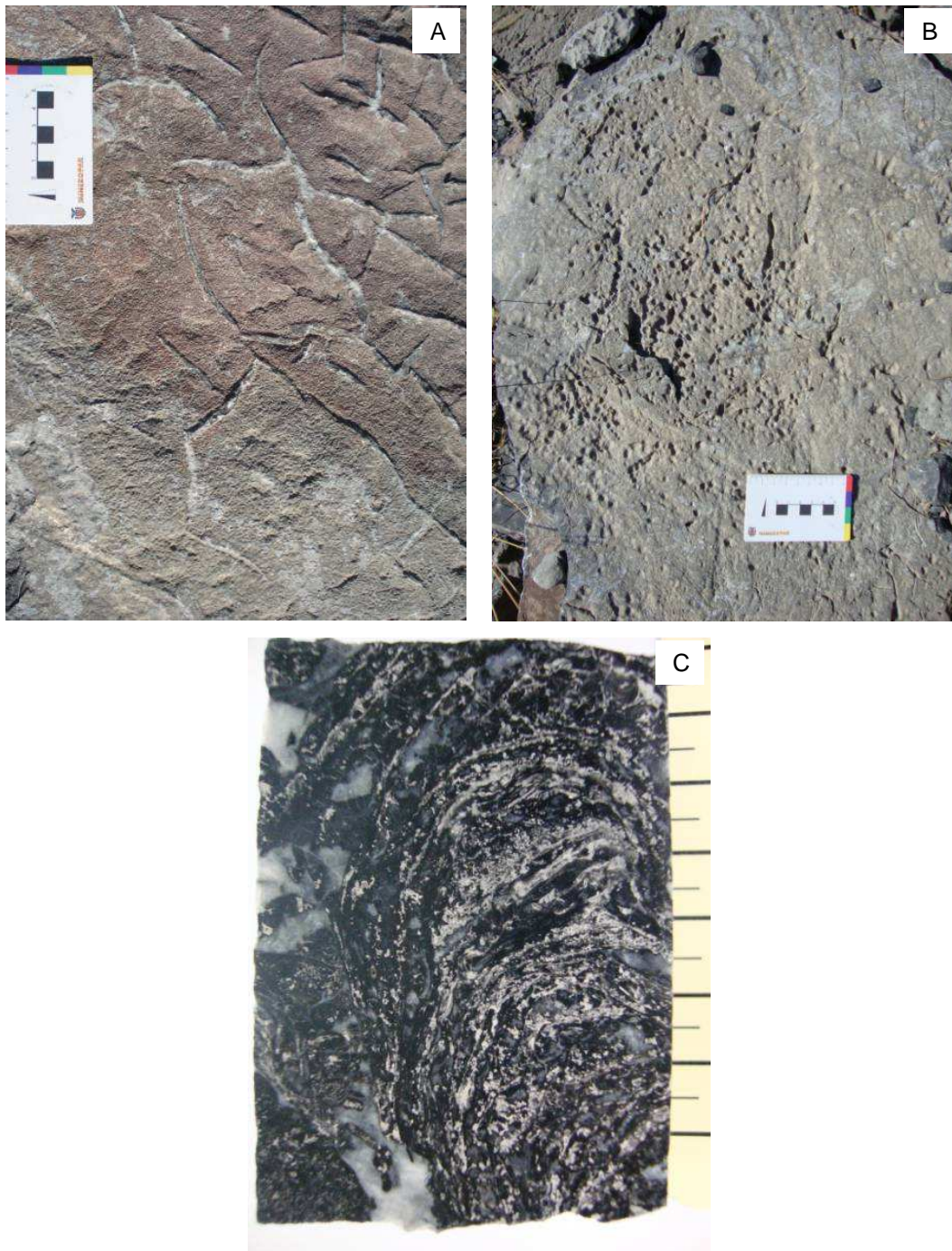


FIGURA 25 – Possíveis estruturas de exposição subaérea preservadas, como gretas de ressecamento (A) e pingos de chuva (B); (C) doloespatos brancos em meio às laminações estromatolíticas.

Nos testemunhos pode-se observar a intercalação entre as fácies *packstone* estromatolítica, sempre com fraturamento doloespático associado, com a fácies *wackestone* dolomítica; essa última com feições de carstificação, indicadas pelas setas amarelas (FIGURA 26).



FIGURA 26 – Testemunho mostrando a variação das fácies, entre 5 m e 10 m de profundidade. A placa indicadora de profundidade tem aproximadamente 2 cm verticais.

As feições sugestivas de carstificação são a presença de argiloso e a porosidade vugular milimétrica a centimétrica. Ocorre associadamente nos testemunhos, “perda de recuperação” da rocha com fragmentos calcários de granulação caótica, dispersos em meio a um solo de coloração marrom ou alaranjado (FIGURA 27).



FIGURA 27 – Testemunhos com feições de carstificação na fácies *wackestone* dolomítica. As placas indicadoras de profundidade têm aproximadamente 2 cm verticais.

Descrição Petrográfica

○ *Amostra de packstone estromatolítico F1 40A*

Ocorrem laminações micríticas grumosas (FIGURA 28A) e cimento espático irregular subédrico a anédrico, possivelmente produto de dolomitização diagenética. Há microfraturamentos e quartzo disperso. Há dolomita subédrica de granulação grossa (em relação à matriz micrítica e espática) preenchendo cavidades, algumas vezes esses cristais apresentam extinção ondulante (FIGURA 28B).

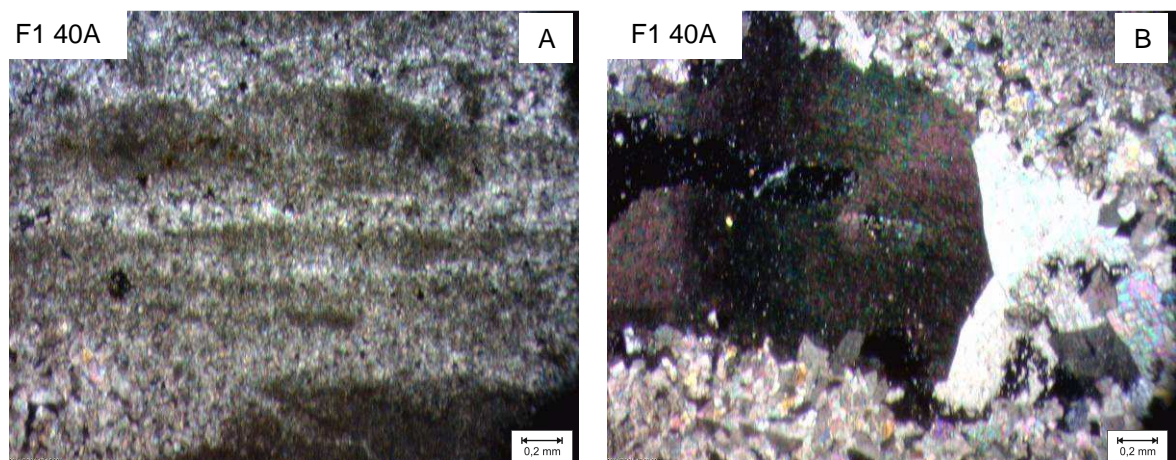


FIGURA 28 – (A) Laminação micrítica grumosa preservada, sob nicóis cruzados; (B) possível dolomita em sela, de preenchimento de cavidade, com extinção ondulante, sob nicóis cruzados.

4.3 FACIOLOGIA DO INTERVALO 2

O Intervalo 2 é denominado “magnesiano” pela mineração e é composto pela fácies *wackestone* com desenvolvimento microbial a estromatolítico (FIGURA 29). As variações são granulométricas, com intercalações de dolarenitos e dololutitos e feições de recristalização e preenchimento de cavidades são observadas como uma variação dessa fácies.

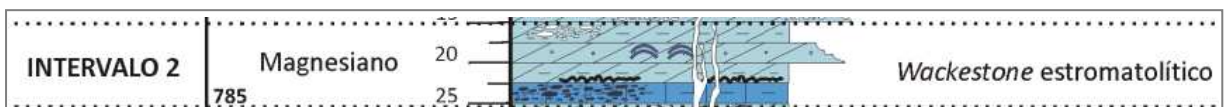


FIGURA 29 – Detalhe do Intervalo 2, com a denominação utilizada na mineração e as fácies encontradas.

4.3.1 Fácies *Wackestone* Estromatolítica

Nas frentes de lavra no intervalo de 795 e 785 m são observadas estruturas estromatolíticas de distribuição irregular e em áreas de ocorrência menores, comparadas às observadas no Intervalo 1 (FIGURA 30A). O dolomito é microcristalino, cinza e maciço a microbially laminado nas cores marrom e cinza escuro, quando não ocorrem estromatólitos (FIGURA 30B).

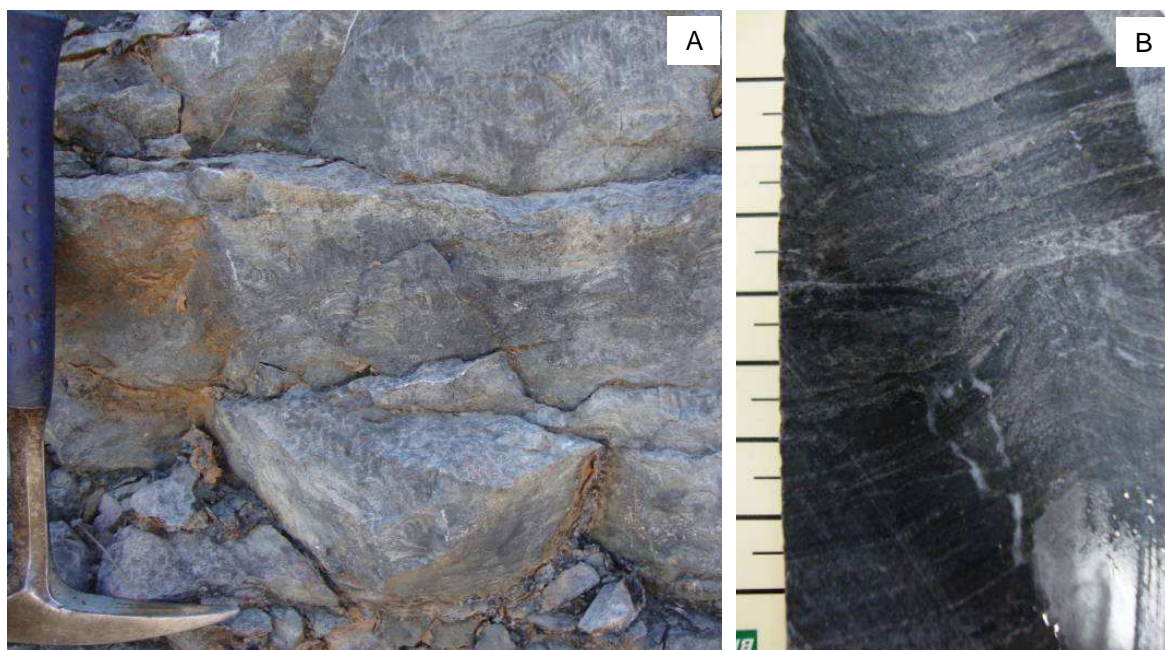


FIGURA 30 – (A) *Wackestone* observado na frente de lavra com estruturas côncavas estromatolíticas; (B) *wackestone* microbial laminado, observado no testemunho, com colapso das construções estromatolíticas, escala centimétrica.

Mesoscopicamente, em testemunho, é possível observar localmente a variação dessa fácies com fraturamento predominante, com geração de brecha e também feições sugestivas de carstificação, como recobrimento argiloso (aspecto sujo) e poros que vão desde milimétricos a aproximadamente 1 cm, ocorrem também estruturas microbiais preservadas (FIGURA 31). Foram descritas duas lâminas da fácies *wackestone*, uma da fácies com microbialito e outra da variação *wackestone* brechada.

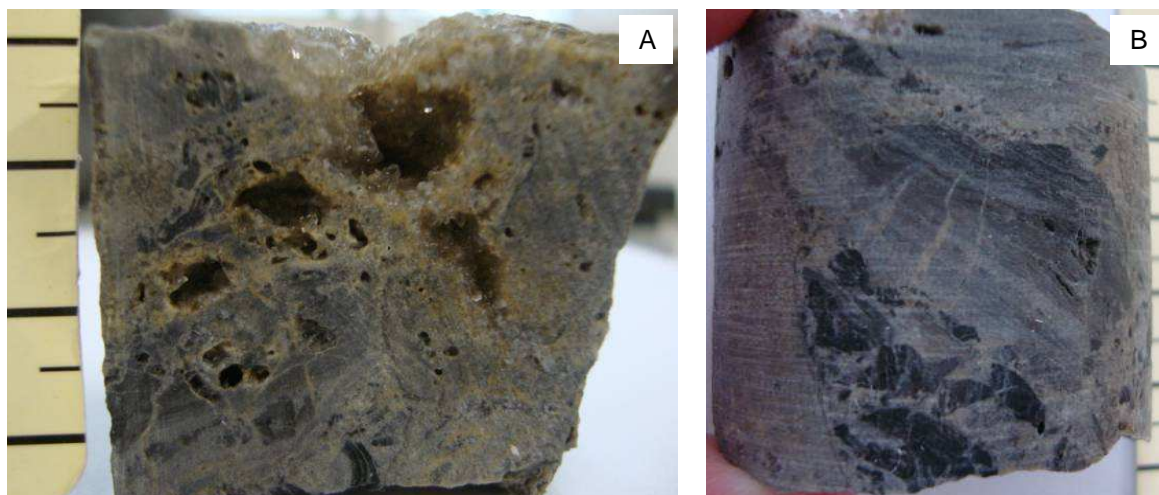


FIGURA 31 – Dois lados de uma amostra de *wackestone* estromatolítico fraturado, obtida em testemunho; lado com porosidade vulgar mesoscópica (A) e lado “maciço” (B). Em ambas as imagens a escala é centimétrica.

Descrição Petrográfica

○ *Amostra de wackestone microbial F16 42B*

Ocorrem lâminações gradacionais: na base da laminação apresenta composição micrítica e em direção ao topo, a cristalinidade do carbonato aumenta (FIGURA 32A). Ocorrem níveis compostos predominantemente por pelóides e intraclastos ocasionais. Nos níveis peloidais, bem como nos níveis de granulação maior, há intensa cristalização de dolomita, com cristais grossos e límpidos em relação à matriz (FIGURA 32B).

Ocorrem estilólitos geminados irregulares de diversas amplitudes. Os estilólitos são posteriores ao fraturamento que houve na rocha. O fraturamento por sua vez, parece ter sido contemporâneo à cristalização espática fina e anterior aos estilólitos (FIGURA 32C). A recristalização espática grossa preenche cavidades, com ainda outra cristalização observada de granulação menor, nas bordas dos oóides e intraclastos.

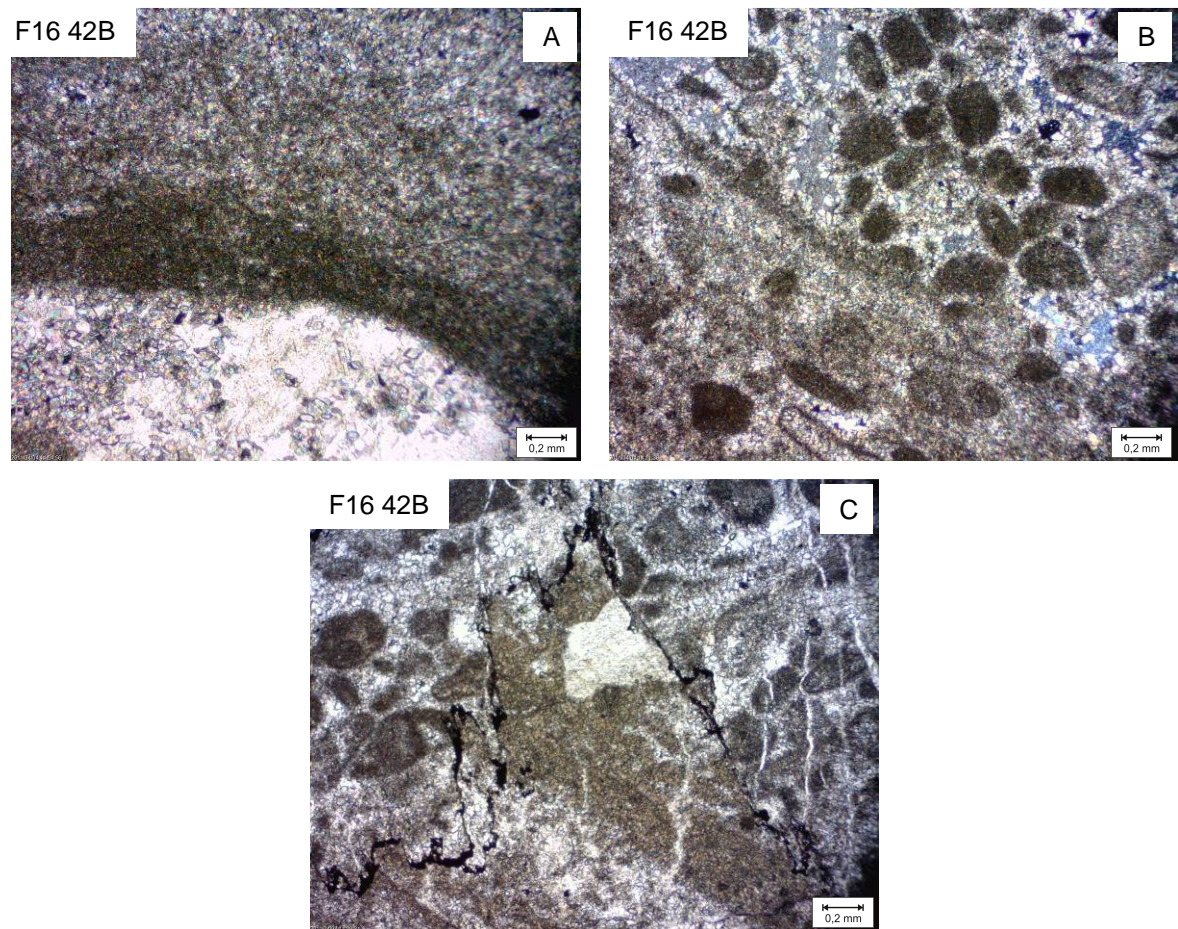


FIGURA 32 – (A) Laminação micrítica se torna granocrescente em direção ao topo, sob nicóis cruzados; (B) matriz do nível peloidal com cristalização espática límpida, sob nicóis cruzados; (C) estilólito irregular oblíquo, posterior ao fraturamento, sob nicóis paralelos.

○ *Amostra de wackestone brechado F6 04*

Observa-se intensa cristalização e fraturas submilimétricas sem preenchimento. Como é possível observar mesoscopicamente, é abrupta a mudança de cristalinidade (FIGURA 33A). Nos locais em que não há cristalização significativa há preservação de cimentação micrítica e “sombras” oolíticas reliquias (FIGURA 33B). Nesses níveis anteriormente oolíticos ocorrem cristais espáticos de dolomita com coloração marrom e aspecto sujo. Ocorrem opacos subarredondados dispersos.

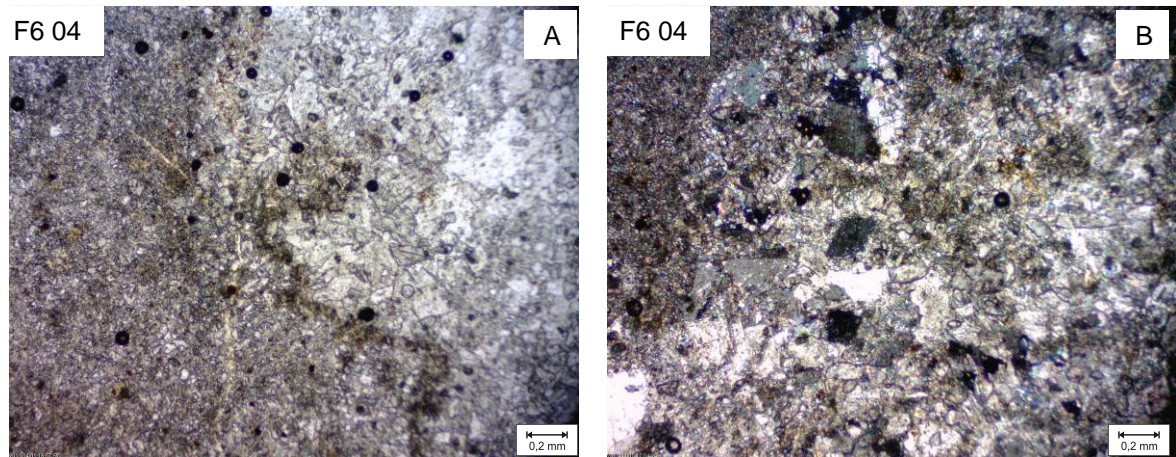


FIGURA 33 – (A) Contato abrupto entre a matriz micrítica original e a espática, sob nicóis paralelos; (B) cristalização espática preferencial em níveis anteriormente oolíticos, sob nicóis cruzados.

4.4 FACIOLOGIA DO INTERVALO 3

O Intervalo 3, em detalhe na FIGURA 34, é denominado “dolomito” pela mineração e é composto pelas fácies *wackestone* estromatolítica, *wackestone* calcítica e *mudstone* calcítica com doloespatos. Pode-se dizer também que, granulometricamente, ocorrem dololutitos, calcilutitos e calcarenitos intercalados. Nos testemunhos é possível observar abundância de brechas sedimentares intraformacionais e cristalizações de dolomita límpida e com granulação grossa. Foram feitas quatro lâminas delgadas em rochas desse intervalo, duas da fácies *wackestone* calcítica e outras duas da fácies *mudstone* calcítica com doloespatos.

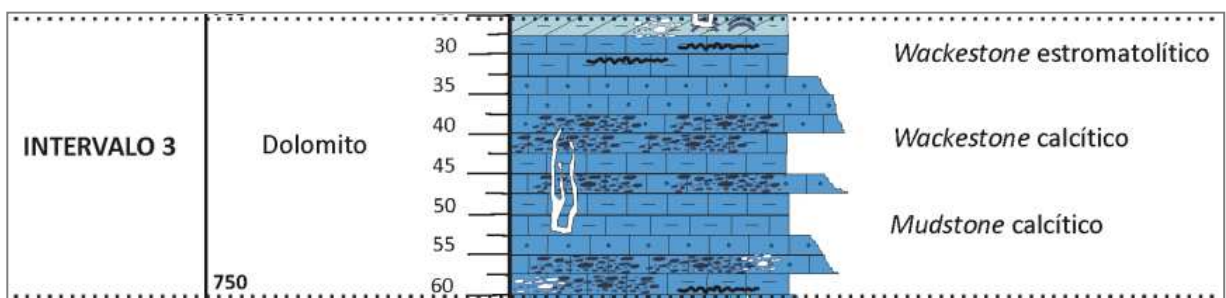


FIGURA 34 – Detalhe do Intervalo 3, com a denominação utilizada na mineração e as fácies encontradas.

4.4.1 Fácies *Wackestone* Estromatolítica

Essa fácies é dolomítica e foi observada nas frentes de lavra com colônias esporádicas estromatolíticas. Há fraturamentos irregulares cortando as rochas e ocorrem cristalizações de dolomita leitosa e com granulações centimétricas, desenvolvidas em meio às laminações das estruturas estromatolíticas (FIGURA 35).

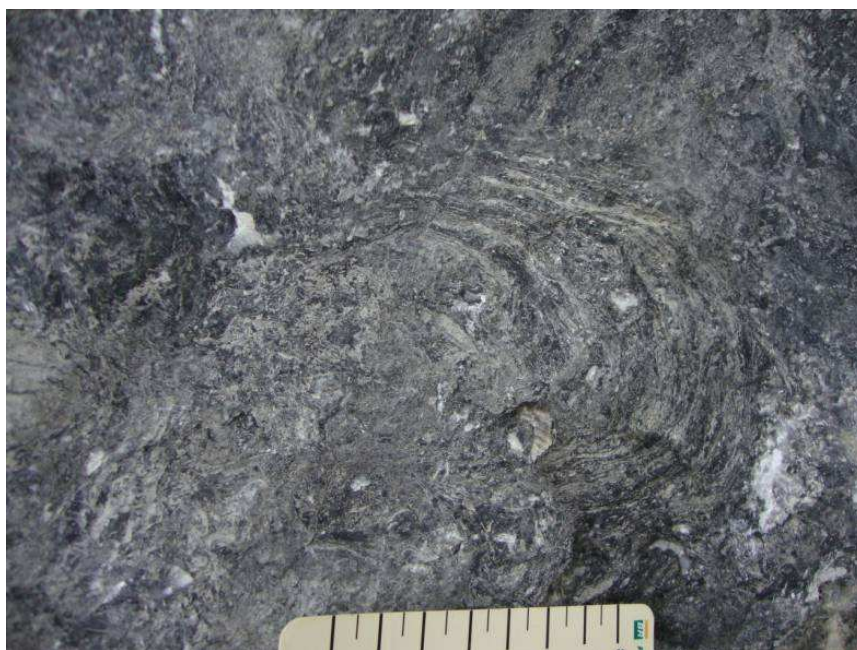


FIGURA 35 – *Wackestone* estromatolítico; nota-se doloespantos em meio às laminações estromatolíticas. Piso de frente de lavra na altitude 760 m. A escala da imagem é centimétrica.

Nessa fácies observam-se feições sugestivas de carstificação na direção N-S, concordante com o padrão regional. Na bancada da frente de lavra na altitude de 750 m – piso 60, ocorrem “bolsões de argila” recobrindo as rochas (FIGURA 36A), por aproximadamente 10 m de extensão lateral. Essa carstificação, possivelmente intempérica atual, também pode ser observada na própria rocha (FIGURA 36B).

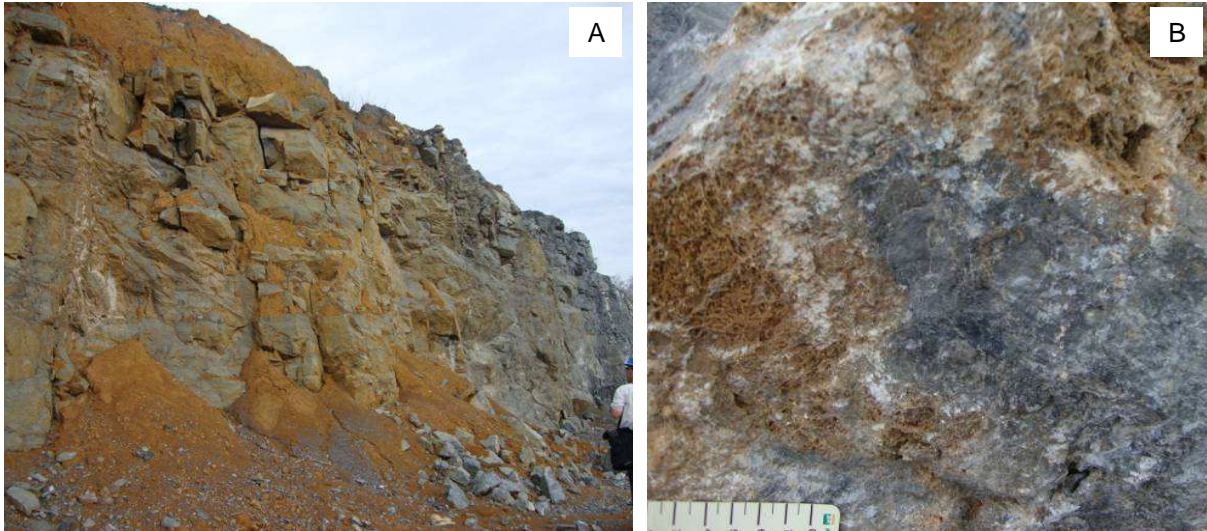


FIGURA 36 – (A) “Bolsão” de argila recobrindo os calcários do piso na cota 750 m; (B) carstificação em bloco do chão próximo, no mesmo piso, escala da imagem centimétrica.

4.4.2 Fácies *Wackestone* Calcítica

Nessa fácies o calcário é cinza e predominantemente maciço com incipiente laminação plano-paralela, devido à variação granulométrica (FIGURA 37A). As laminações plano-paralelas são submilimétricas cinza e descendente, percebe-se nível marrom gradacional com até aproximadamente 1 cm, possivelmente mais argiloso. Fraturas submilimétricas cortam a rocha, de maneira discordante e concordante ao acamamento.



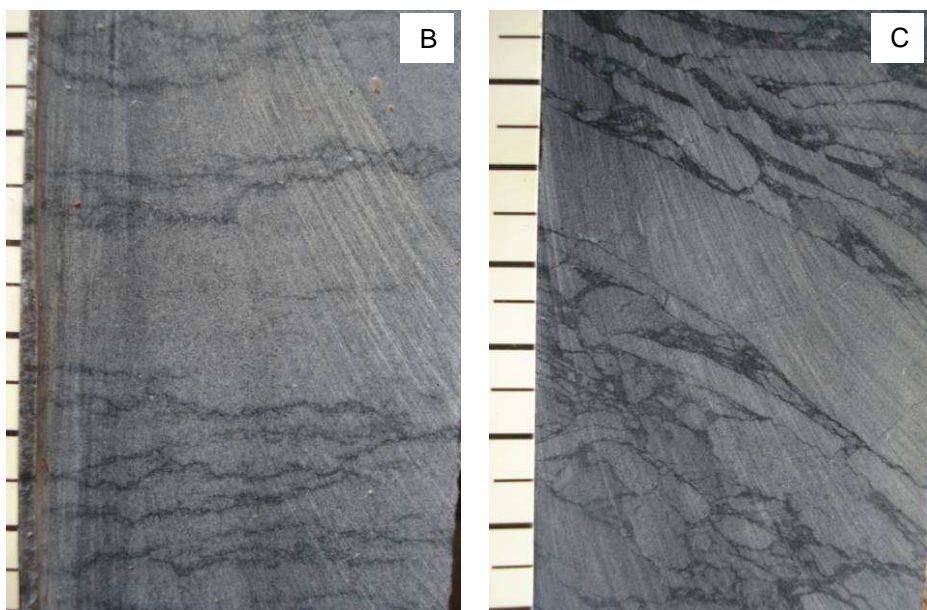


FIGURA 37 – (A) *Wackestone* calcítico, observado em frente de lavra na altitude 770 m; (B) variações na fácies *wackestone* calcítica, com estilólitos; (C) ocorrência de brechas sedimentares.

No testemunho de sondagem, é possível observar uma variação dessa fácies com estilólitos (FIGURA 37B) e com brechas sedimentares intraformacionais (FIGURA 37C). Essas brechas possuem clastos angulosos frequentemente alongados de cor cinza claro em relação à matriz cinza escuro; a matriz nessas rochas é argilosa microcristalina.

Descrição Petrográfica

○ *Amostra de wackestone calcítico TA01 B*

Observa-se uma gradação granulométrica da base para o topo da rocha e destacam-se laminações com intraclastos. No nível granulométrico maior há laminações argilosas cor marrom entre os cristais, que ocasionalmente gradam para estilólitos descontínuos e localizados.

Os cristais de granulação maior são homogêneos quanto ao aspecto “sujo” (FIGURA 38A). Há contornos bem delimitados ao redor de oóides, observados em alto relevo, e a lâmina é cortada por vênulas carbonáticas. No nível granulometricamente maior, há um intraclasto rudáceo com recristalização no interior dos grãos (FIGURA 38B).

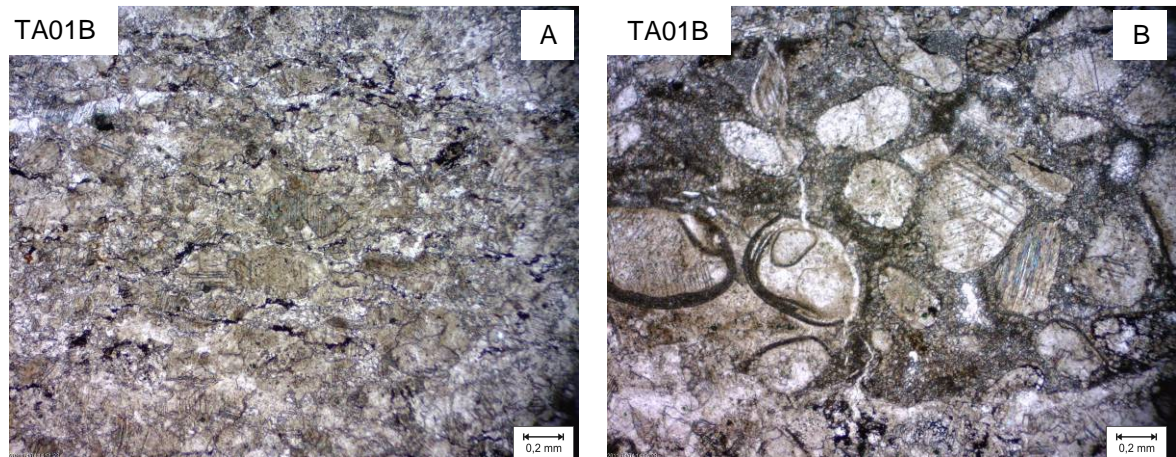


FIGURA 38 – (A) Laminação granulométrica calcarenítica com filmes argilosos entre os cristais, sob nicóis paralelos; (B) intraclasto rudáceo com oóides recrystalizados, sob nicóis paralelos.

○ *Amostra de wackestone calcítico com brecha sedimentar F6 10*

Os clastos são predominantemente micríticos, ocorrendo cristais de quartzo límpido, que se sobressaem em relação à granulação fina da matriz (FIGURA 39A). Os clastos ocasionalmente contêm filmes de argila ou óxidos contornando-os, e material argiloso ao redor de porções recrystalizadas no clasto.

A matriz possui cristais de calcita com aspecto sujo e material argiloso entre os mesmos. Há locais em que, na matriz, a cristalização parece ter ocupado espaços que haviam anteriormente; próximo aos clastos, esses cristais são límpidos e anédricos (FIGURA 39B). Ocorrem estilólitos geminados irregulares e se pode observar que quando os mesmos atravessam os clastos, sua amplitude diminui enquanto que, na matriz, sua amplitude aumenta e diversifica-se.

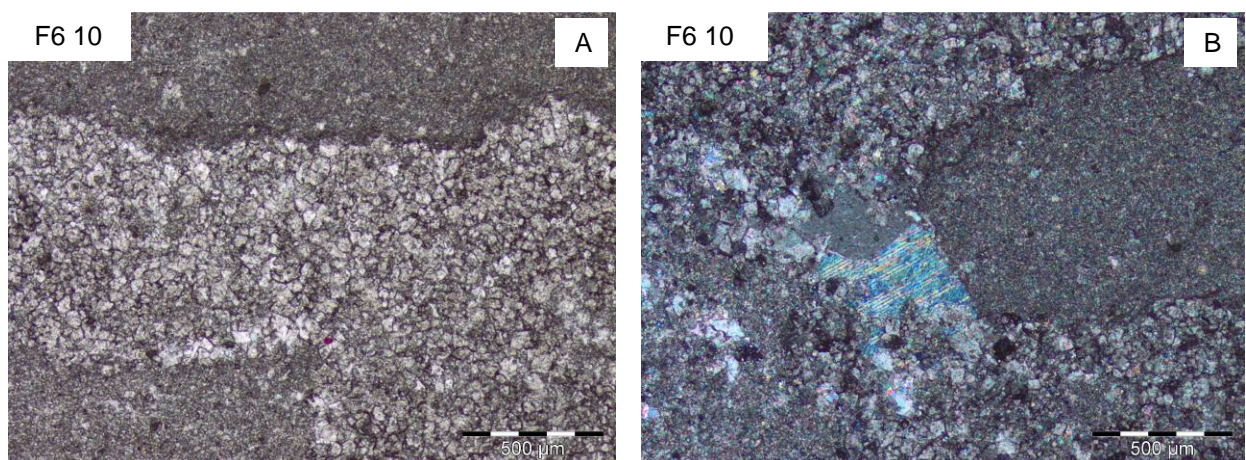


FIGURA 39 – (A) Diferença de cristalinidade da matriz e dos clastos, esses com limites bem definidos, sob nicóis paralelos; (B) cristais de dolomita límpidos e de granulação grossa em relação à matriz, sob nicóis cruzados.

4.4.3 Fácies *Mudstone* Calcítica

Na frente de lava é possível observar um calcário microcristalino no qual há níveis em que cristais de dolomita límpidos e brancos se sobressaem, conferindo à rocha uma granulação mais grossa (FIGURA 40A). Nos testemunhos de sondagem é possível observar que se trata de um calcário de granulação fina, com porções nas quais há formação de uma brecha sedimentar, com ou sem doloespato (FIGURA 40B).

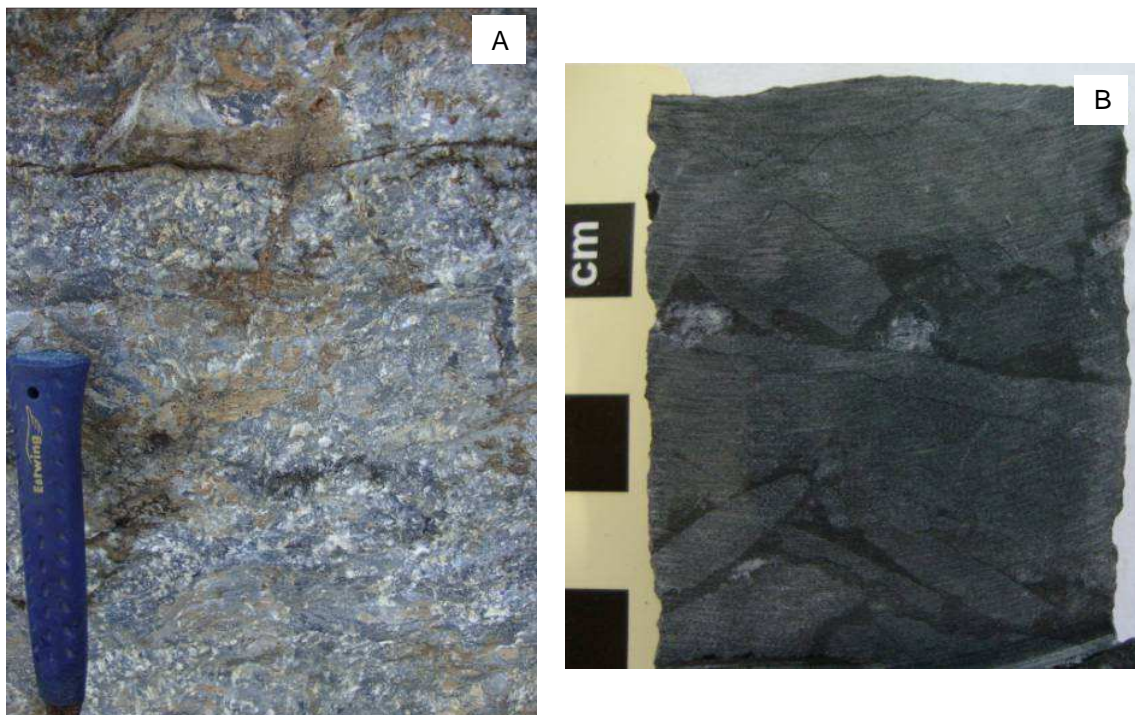


FIGURA 40 – (A) *Mudstone* calcítico com doloespato observado na frente de lava; (B) *mudstone* com brecha sedimentar e doloespato.

Descrição Petrográfica

- *Amostra de mudstone calcítico com doloespato F6 12A*

A lâmina mostra um fraturamento não evidenciado, com desenvolvimento de “megacristais” de dolomita em relação a matriz, abruptos, subédricos e límpidos. A matriz é entrecortada por estilólitos ramificados de curtas amplitudes. Em uma porção ocorrem sombras peloidais e de intraclastos reliquiares em meio aos cristais de dolomita (FIGURA 41A).

Esses cristais têm aproximadamente 4 mm e parece que, quando a entrada do material ocorreu, houveram rompimentos na rocha, pois desses núcleos cristalinos partem estilólitos de curtas amplitudes, porém contínuos na matriz micrítica. É possível observar uma textura polimodal (FIGURA 41B) nas recrystalizações: uma com granulação menor nas bordas do cristal maior.

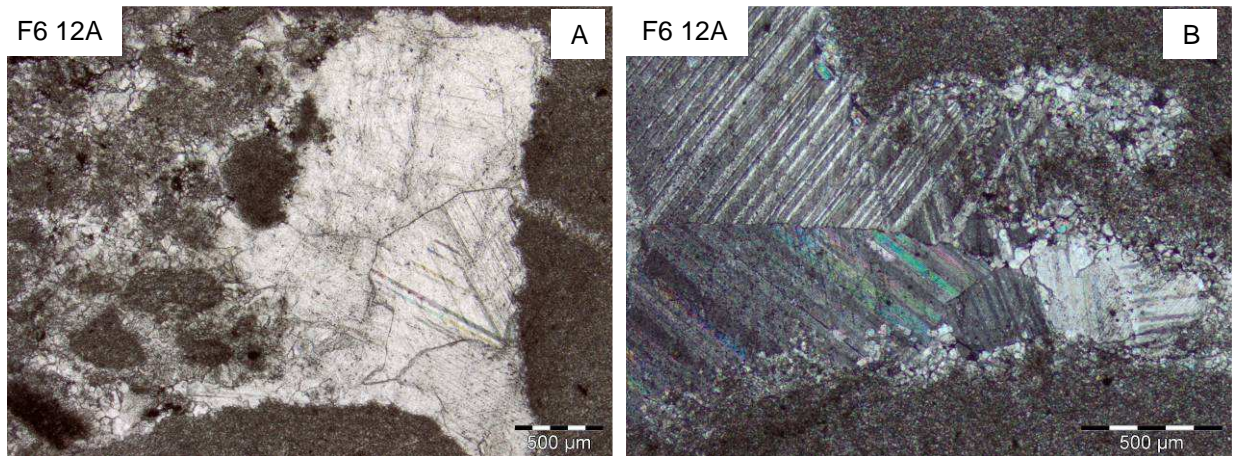


FIGURA 41 – (A) Nível peloidal resistente, com recrystalização heterogênea, sob nicóis paralelos; (B) cristalização polimodal em meio à matriz micrítica, sob nicóis cruzados.

○ *Amostra de mudstone calcítico com doloespátos e brecha sedimentar F6 14B*

É possível observar duas granulações nos clastos, uma delas centimétrica e outra menor, com clastos em meio à matriz iguais ou inferiores a 5 mm. Próximo às bordas dos clastos há cristais de aproximadamente 50 μ , de aspecto sujo que, em direção ao centro da matriz, ficam maiores a 100 μ e límpidos. Ocorrem sombras peloidais micríticas ocasionais (FIGURA 42A).

Há cristais de aproximadamente 150 μ , subédricos, com extinção ondulante (FIGURA 42B) e possível formação de dolomita barroca em algumas localidades. Essa dolomita barroca tem bordas de clivagens amarronzadas, relevo alto, pleocroísmo e granulometria de aproximadamente 100 μ (FIGURA 42C).

Ocorrem opacos anédricos subarredondados dispersos em meio à matriz de aspecto sujo. Algumas vezes, estilólitos parecem se desenvolver ao redor dos clastos, definindo os limites de sua composição micrítica (FIGURA 42D).

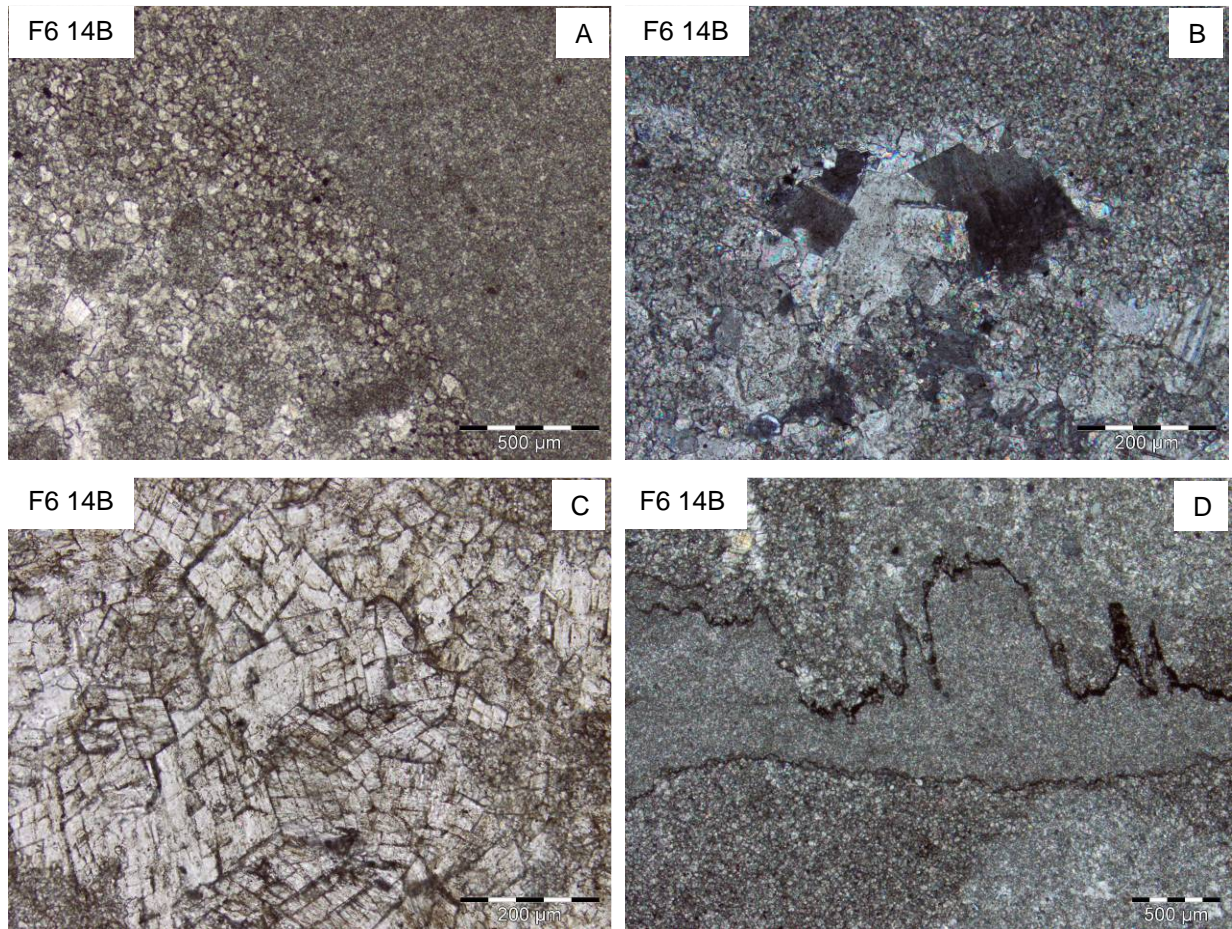


FIGURA 42 – (A) Nível reliquiar peloidal micritizado em contato gradacional com cimento, sob nicóis paralelos; (B) extinção ondulante em dolomita espática polimodal, sob nicóis cruzados; (C) possível dolomita barroca ocasional no cimento espático, sob nicóis paralelos; (D) estilólitos de diversas amplitudes parecem delimitar o clasto, sob nicóis cruzados.

4.5 FACIOLOGIA DO INTERVALO 4

O Intervalo 4 ou denominado de “transição” pela mineração, em detalhe na FIGURA 43, corresponde a um horizonte de lavra problemático na mineração, pois ocorre aumento nos teores de MgO inviabilizando a exploração do calcário. Consiste nas fácies *mudstone* laminada, observada com detalhes em amostras de testemunhos e na fácies *mudstone* brechada, que pôde ser observada em frente de lavra em escala mesoscópica. Foi descrita uma lâmina delgada da fácies brechada, de amostra retirada da frente de lavra.

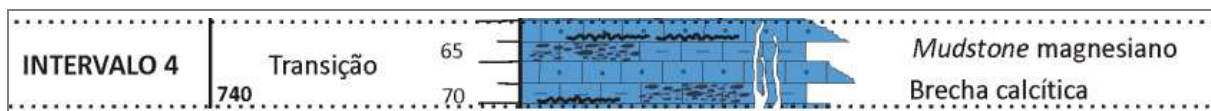


FIGURA 43 – Detalhe do Intervalo 4, com a denominação utilizada na mineração e as fácies encontradas.

4.5.1 Fácies *Mudstone* Magnésiana

Essa fácies é calcítica e possui laminações com granulação submilimétrica a até no máximo 1 cm de *mudstone*, *wackestone* e laminações escuras com matéria orgânica; essas laminações podem ser observadas na FIGURA 44. O intervalo com *wackestone* é composto por oólitos e pelóides que ocasionalmente gradam lateralmente para um *grainstone*. Nos oólitos reliquias desenvolvem-se granulações de carbonatos maiores ao restante da matriz.



FIGURA 44 – *Mudstone* laminado com *wackestone* peloidal intercalado com matéria orgânica. A escala na imagem é centimétrica.

4.5.2 Fácies Brecha Calcítica

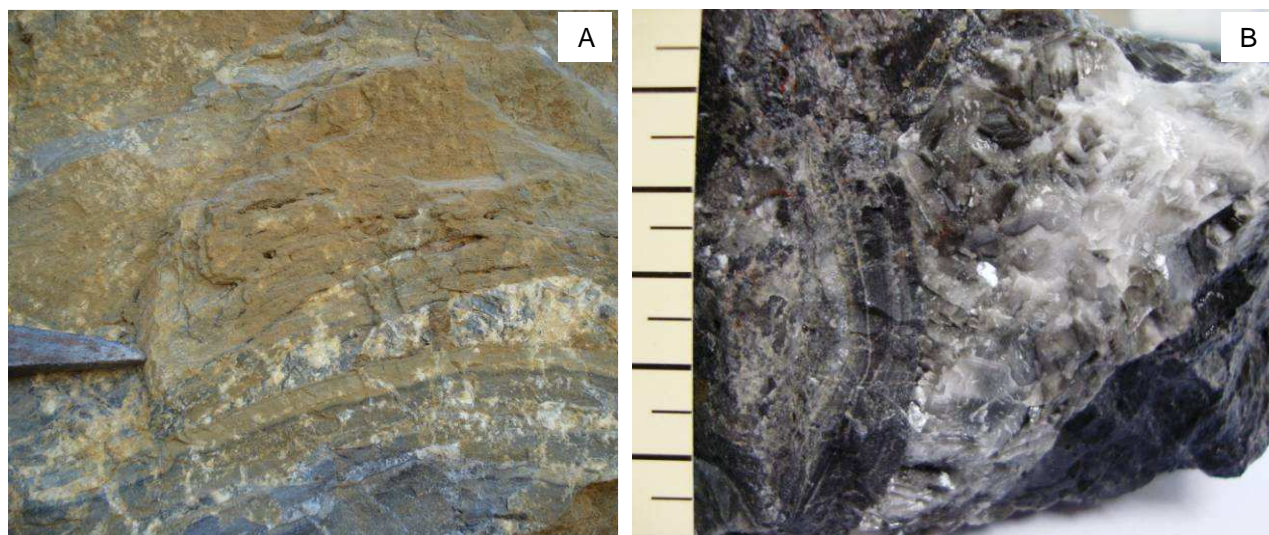
Essa fácies é bem visível nas frentes de lavra e parece ocorrer localizadamente, não foi encontrada correlação dela nas amostras dos testemunhos. No piso 745 da bancada em 750 m altitude da frente de lavra, ocorre *mudstone* dolomítico com laminações possivelmente de origem microbial, que são

heterogêneas quanto à alteração intempérica, ocorrem estratos mais maciços intercalados a estratos finamente laminados.

Ocorrem cristais de calcita branca e cinza, centimétricos, que parecem se cristalizar preferencialmente nos níveis mais maciços (esses não são tão resistentes ao intemperismo quanto os finamente laminados), como aparece nas FIGURAS 45A e 45B. As laminações são microcristalinas e podem ser observadas devido à variações de cor: cinza escuro e amarronzadas. Sobre as rochas dessa frente de lavra observa-se recobrimento argiloso sugestivo de carstificação.

Em determinada localidade da bancada, é possível visualizar a configuração de uma brecha possivelmente hidráulica, com clastos subarredondados cimentados com pelo menos duas fases distintas no cimento: cristais de calcita cinza, nas bordas próximas ao clasto, e calcita branca no centro do cimento (FIGURA 45C); a granulometria dos cristais chega a 1,5 cm.

Em outra localidade da mineração, também na bancada de 750 m de altitude - piso 740, observa-se em blocos no chão, fraturamentos e brechas em *mudstone* predominantemente maciço, com formação pontual de brechas, com clastos angulosos e cimentação branca, calcítica, com cristais de até 1,5 cm (FIGURA 45D). Em algumas porções do *mudstone* dolomítico, observa-se ainda microporosidade.



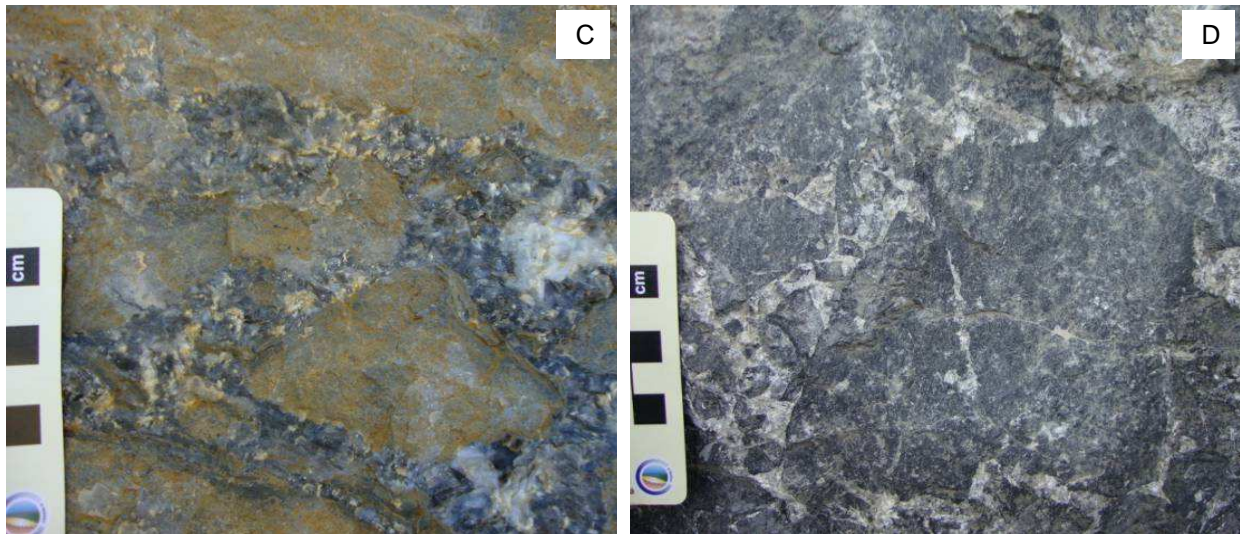


FIGURA 45 – (A) Cristais de calcita branca e cinza, na frente de lavra; (B) detalhe mesoscópico dos cristais de calcita branca, observado no piso 745 m, com escala centimétrica; (C e D) *mudstone* dolomítico brechado, configurado em duas localidades diferentes da mineração, ambas na bancada com 750 m altitude.

Descrição Petrográfica

○ *Amostra de mudstone laminado com brecha TA05*

Observam-se estruturas originais possivelmente microbiais cortadas por fraturamento preenchido por calcita, de dois eventos (FIGURA 46A). Entre as laminações há desenvolvimento de cristalização nas bordas e em direção ao centro, os cristais de calcita tornam-se maiores e límpidos (FIGURA 46B). A partir dos veios, há escapes para as porções mais cristalinas entre as laminações argilosas, com venulações geminadas.

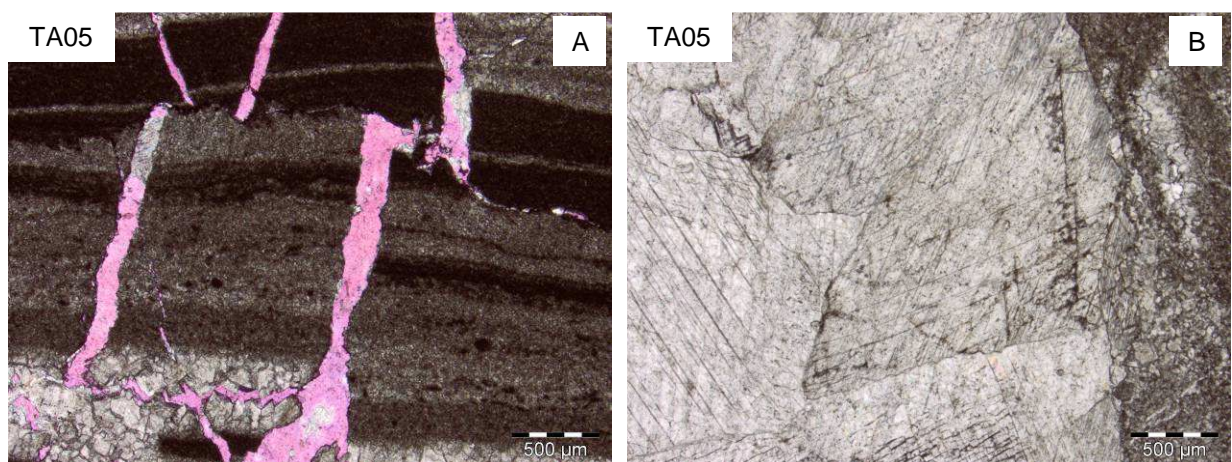


FIGURA 46 – (A) Estruturas primárias microbiais fraturadas e cristalização calcítica preferencial concordante, sob nicóis paralelos; (B) “megacristais” em contato abrupto com a matriz micrítica original, sob nicóis paralelos.

4.6 FACIOLOGIA DO INTERVALO 5

O Intervalo 5 ou como é denominado pela mineração, “calcário” (FIGURA 47), é o intervalo mais amplo, abrangendo uma espessura de cerca de 50 m verticais de rochas lavradas. Ocorrem as fácies *wackestone* calcítica com estilólitos e brechas sedimentares intraformacionais, e a fácies *mudstone* transicional, assim denominada por representar uma deposição gradacional de calcissiltitos em meio ao calcário, que persiste até a fácies *mudstone* margosa, no Intervalo 6. Pode ser denominado também como um intervalo que é composto por calcilutitos laminados com níveis argilosos, calcarenitos estilolíticos com doloespátos e, em direção à base, intercalação de calcilutitos, calcissiltitos e laminações carbonosas pretas.

Nesse intervalo foram descritas cinco lâminas delgadas: quatro lâminas da fácies *wackestone* calcítica, uma da variação estilolítica e uma da variação brecha sedimentar e outra da fácies *mudstone* transicional.

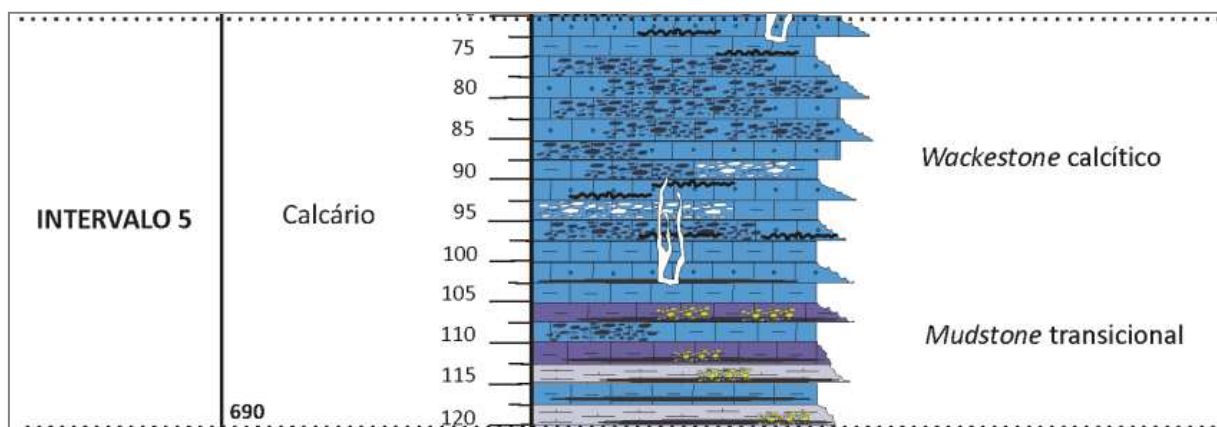


FIGURA 47 – Detalhe do Intervalo 5, com a denominação utilizada na mineração e as fácies encontradas.

4.6.1 Fácies *Wackestone* Calcítica

Essa fácies é composta por calcários com laminações milimétricas a centimétricas, oolíticas e peloidais, intercaladas no calcário microcristalino. Preferencialmente nos níveis peloidais é possível observar fraturamentos e venulações com cristalização dolomítica associada. Ocorrem ainda laminações argilosas escuras microcristalinas irregulares (FIGURA 49B). Nas frentes de lavra

observa-se o reflexo dessa laminação nas estratificações plano-paralelas evidentes (FIGURAS 49A e 49C).

Nos níveis peloidais com cristalização espática, sub-paralelos ao acamamento, ocorre também fraturamento vertical discordante, de espessura milimétrica, como pode se observar nas FIGURAS 48A e 48B.

Uma variação dessa fácies é observada com estilólitos abundantes e frequente ocorrência de brecha sedimentar intraformacional. Essas brechas são irregulares, com clastos alongados que muitas vezes parecem delimitados pelos estilólitos. No testemunho é possível observar características de carstificação, com arredondamento e fragmentação das amostras.

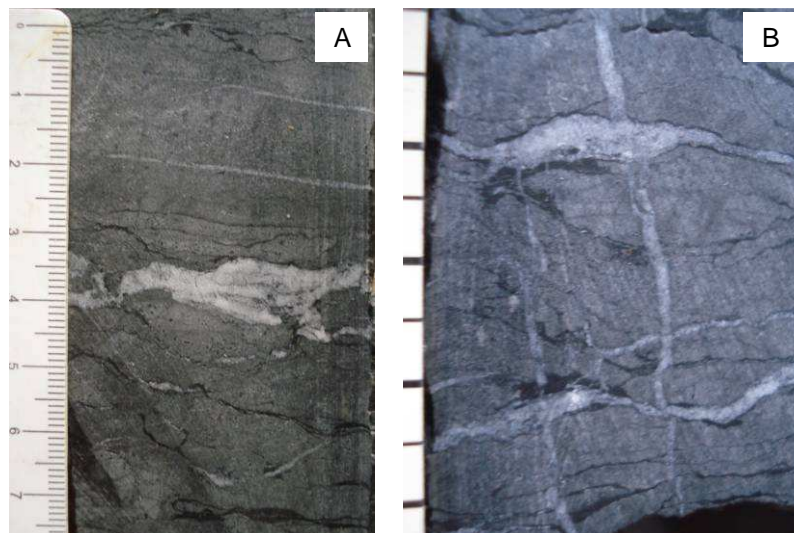


FIGURA 48 – Cristalização doloespática concordante (A e B) e fraturas posteriores discordantes à cristalização (B). Em ambas as imagens a escala é centimétrica.

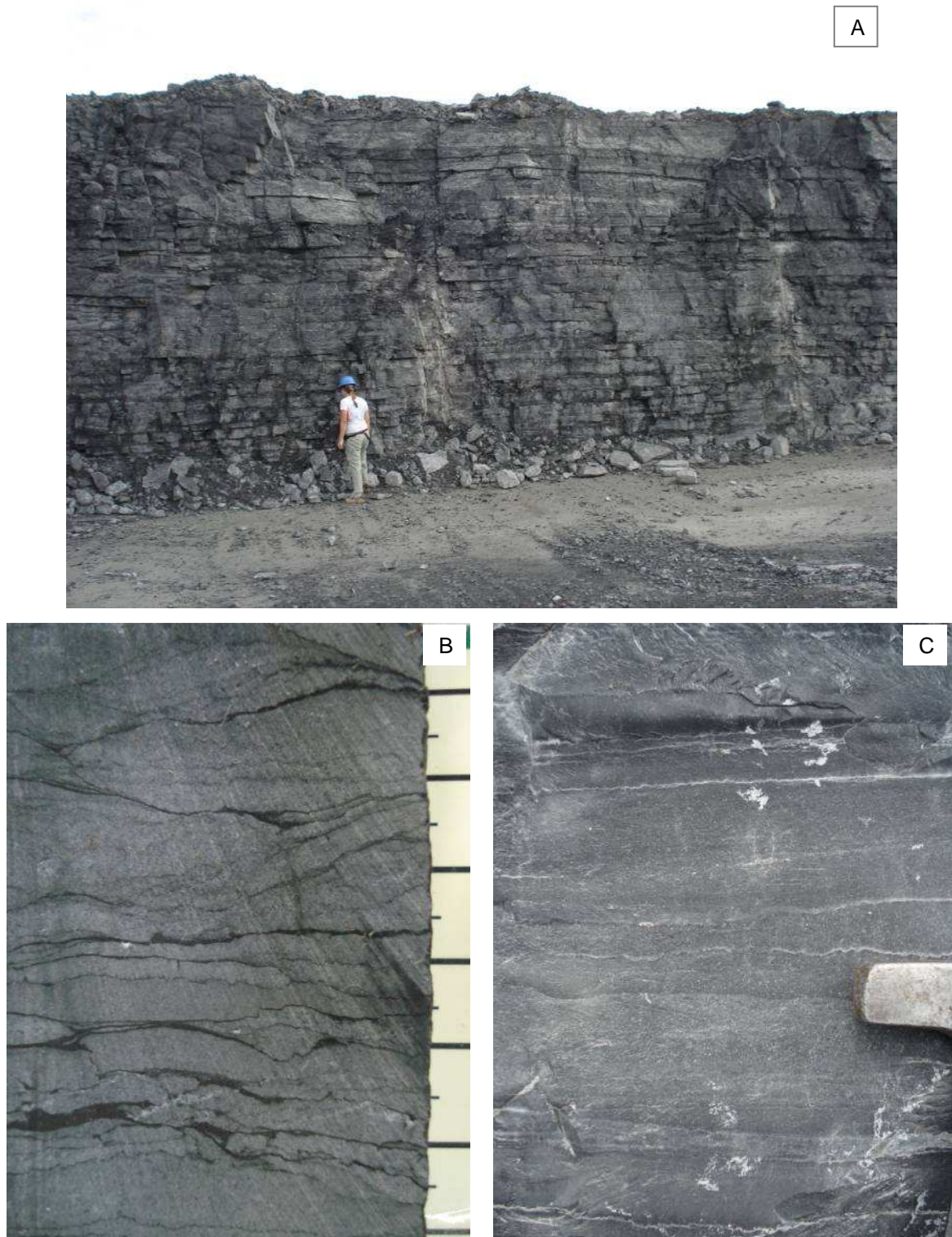


FIGURA 49 – (A) *Wackestone* calcítico estratificado na bancada de 725 m altitude; (B) *wackestone* calcítico, escala da imagem centimétrica; (C) detalhe da estratificação observada na bancada de 710 m de altitude.

Descrição Petrográfica

○ *Amostra de wackestone calcítico F6 17B*

Observam-se níveis calcíticos predominantemente com cristais de cerca de 20 μ e um nível com cristais de aproximadamente 60 μ . Esses níveis calcíticos são homogeneamente micríticos com cristais de granulação maior em direção ao centro. No aumento de 100X é possível observar sombras oolíticas, mal preservadas, que estão preenchidas por cristais de calcita límpida e anédrica, com aproximadamente 350 μ .

Nos cristais espáticos das venulações (FIGURA 50A), a granulação atinge 800 μ e em alguns desses há “inclusões” carbonáticas de granulação menor, posteriores. Ocorrem veios de calcita cortados por estilólitos submilimétricos, que estão ligados às camadas escuras argilo-carbonosas. Nessas camadas escuras é possível distinguir cristais carbonáticos, clorita (?) e uma “massa” criptocristalina marrom; na borda inferior, ocorre quartzo microcristalino e carbonatos recristalizados, também há ocasional plagioclásio (FIGURA 50B).

Há níveis que lembram estilólitos, mas há dúvida se são laminações primárias onduladas, com acúmulos de argila em locais preferenciais.

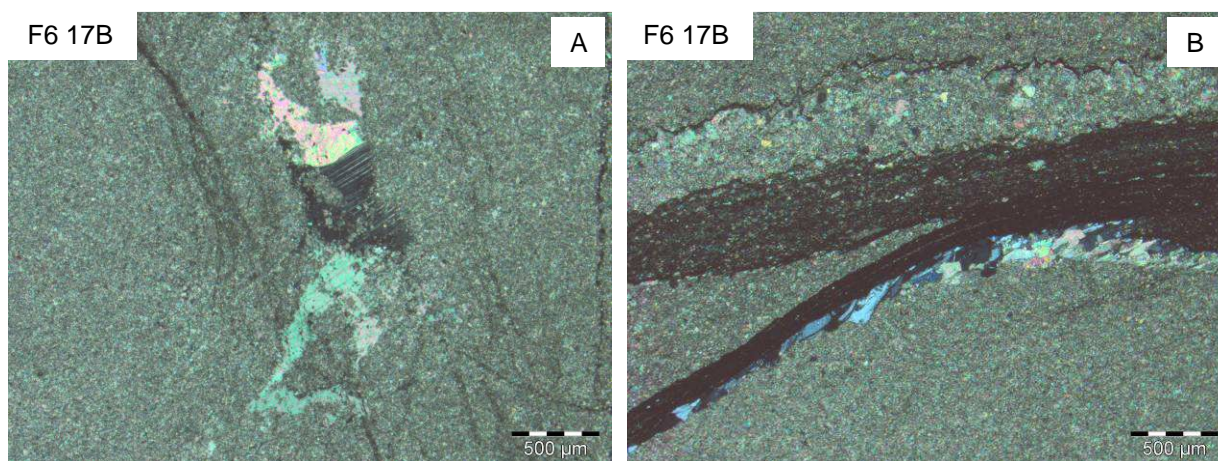


FIGURA 50 – (A) Laminação micrítica com cristais espáticos preenchendo as vênulas, sob nicóis cruzados; (B) quartzo microcristalino e carbonato na borda inferior da laminação argilosa, sob nicóis cruzados.

○ *Amostra de wackestone calcítico F6 25B*

Mesoscopicamente destacam-se na rocha três níveis que podem ser diferenciados: um nível cinza com granulação maior e cortado por estilólitos com

preenchimento argiloso, um nível na base que corresponde a uma laminação silicosa com cor amarronzada, e um nível de calcário maciço criptocristalino.

Petrograficamente são visualizados dois níveis principais, um homogêneo, separado de um heterogêneo por uma laminação escura argilosa (FIGURA 51A); em sua borda superior ocorre laminação de quartzo microcristalino. No nível homogêneo ocorrem apenas variações granulométricas nos carbonatos constituintes; há cristais desde micríticos a até 200 μ . Quando ocorrem cristais maiores, estes se desenvolvem em estruturas circulares oolíticas.

Há opacos semi-arredondados dispersos, de diversas granulações, com maior concentração na laminação argilosa de separação. No nível com cristalização de granulação mais grossa, essa se deu preferencialmente no interior de estruturas reliquiares (FIGURA 51B). Esses cristais são límpidos, polimodais planares subédricos a euédricos e observa-se também contatos lobados e curvos.

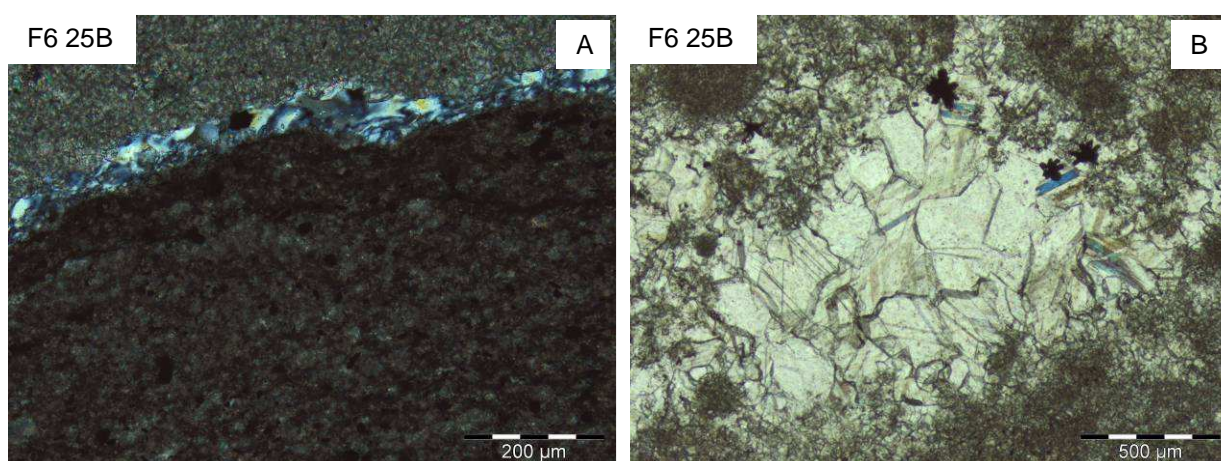


FIGURA 51 – (A) Ocorrência de quartzo microcristalino e opacos na laminação argilosa, sob nicóis cruzados; (B) nível com estruturas primárias micritizadas e contatos curvos e lobados dos cristais límpidos, sob nicóis paralelos.

○ *Amostra de wackestone calcítico com estilólitos F6 19B*

Ocorrem laminações escuras submilimétricas, intercaladas a níveis carbonáticos com gradação argilosa e observa-se abundância de estilólitos. Há porções cristalizadas nos níveis carbonáticos, com cristais submilimétricos, porém maiores que a matriz, límpidos. Um veio contínuo submilimétrico corta as laminações verticalmente.

Os estilólitos são geminados, irregulares e de diversas amplitudes. Dúvida se houve deposição e compactação que remobilizou o material argiloso para o

interior dos estilólitos (FIGURA 52A). Posteriormente, houve fraturamento e cristalização na matriz carbonática, esses cristais são límpidos e anédricos. Há níveis com estruturas oolíticas semi-preservadas e estruturas micritizadas circulares. Nos níveis oolíticos há preenchimento das estruturas por quartzo microcristalino, conforme FIGURA 52 B.

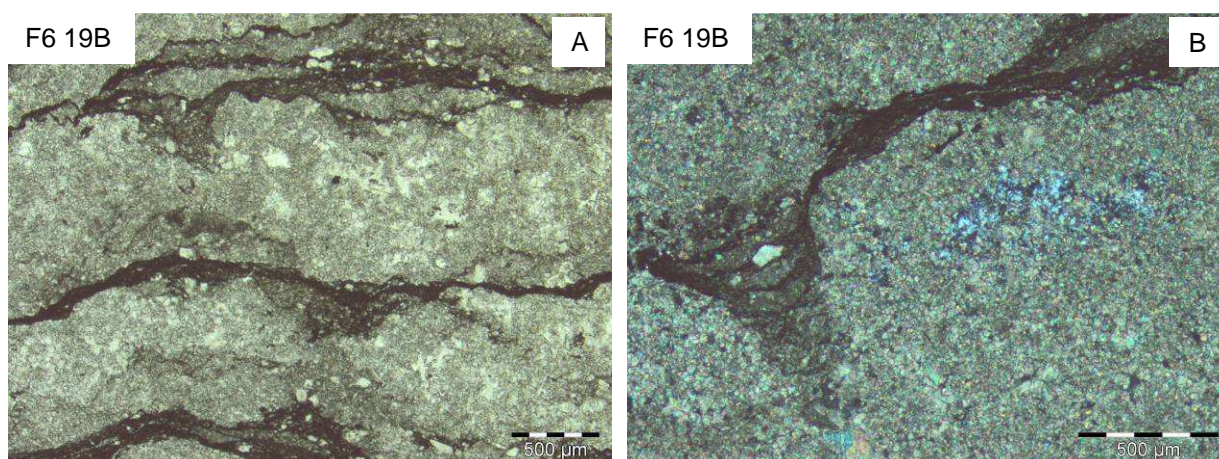


FIGURA 52 – (A) Estilólitos irregulares geminados, sob nicóis paralelos; (B) níveis reliquiais primários com quartzo microcristalino, sob nicóis cruzados.

○ *Amostra de wackestone calcítico com estilólitos F6 22A*

Observa-se na lâmina, estilólitos com material argiloso remobilizado. Entre as estratificações, o nível carbonático possui aspecto sujo e estruturas nodulares circulares límpidas. No nível inferior sem estilólitos, parece ter havido cristalização com granulação mais grossa em meio à matriz cinza e fina, com cristais límpidos e de granulação maior.

Há dúvida se os estilólitos se desenvolveram em várias fases, havendo nas cristas das amplitudes, vários estágios de preenchimento ou remobilização do material argiloso (FIGURA 53A). Ao mesmo tempo, houve recristalização de carbonatos subédricos a anédricos. No nível carbonático oolítico ocorre preenchimento das estruturas reliquiais por quartzo microcristalino, de aspecto sujo nas bordas e límpido em direção ao centro (FIGURA 53B). Ocorrem pirritas dispersas na matriz, preferencialmente sobre o quartzo.

A matriz cristalizada grossa apresenta cristais com contatos predominantemente planares; os estilólitos são geminados e possuem diversas amplitudes.

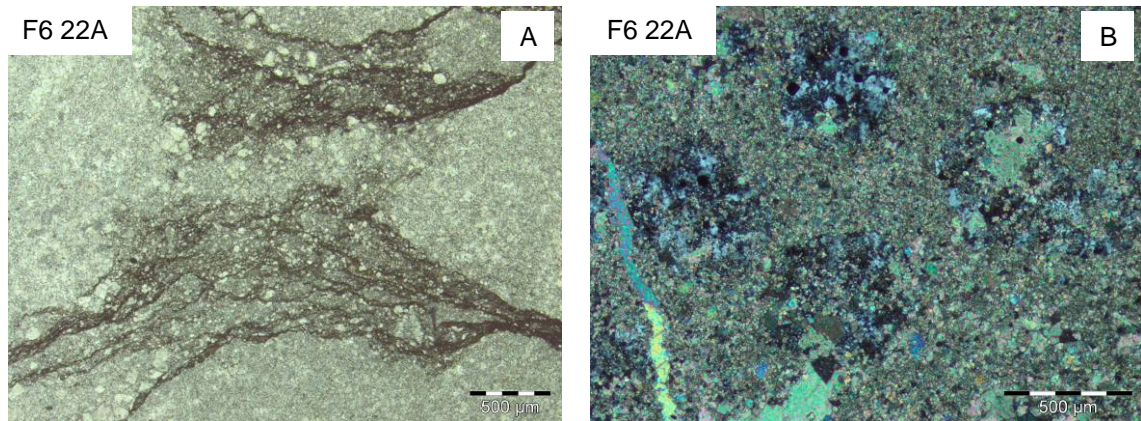


FIGURA 53 – (A) Estilólitos com várias fases de preenchimento argiloso, sob nicóis paralelos; (B) quartzo microcristalino ocupando estruturas oolíticas, sob nicóis cruzados.

4.6.2 Fácies *Mudstone* Transicional

Essa fácies é composta por calcissiltitos intercalados de maneira gradacional a calcilutitos. Na frente de lavra no piso em 700 m altitude, em direção à base limite da mineração, as rochas adquirem coloração superficial esbranquiçada, devido ao recente rebaixamento do nível freático. Essa configuração pode ser observada na FIGURA 54A. O calcário possui estratificações plano-paralelas (FIGURA 54B) e ocorrem fraturas recentes preenchidas por cristais subédricos de calcita branca e fluorita roxa.

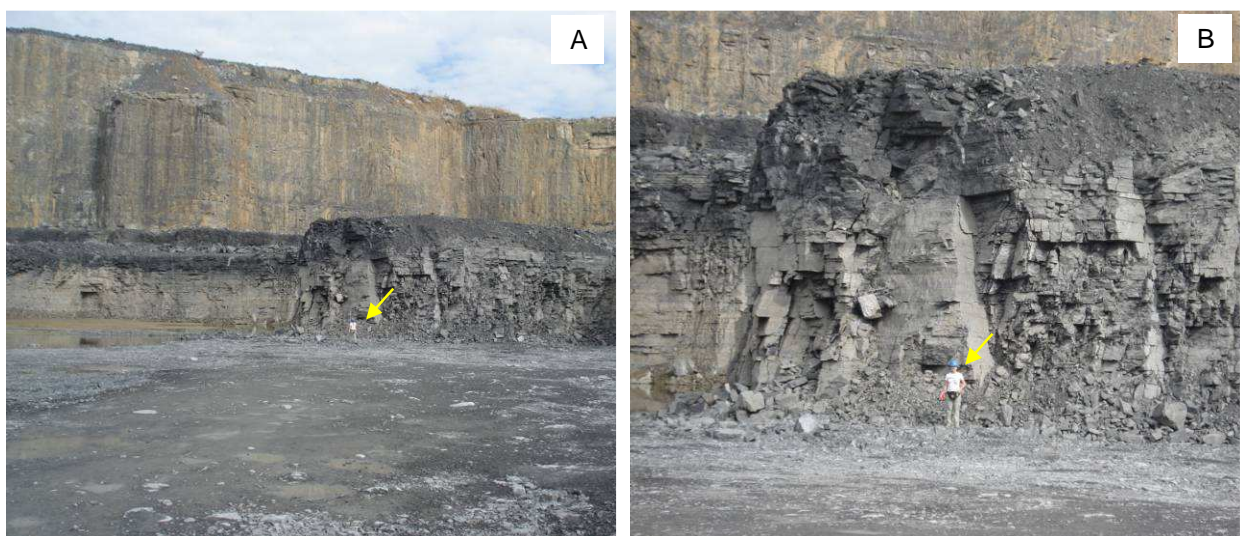


FIGURA 54 – (A) Configuração do limite vertical do avanço da lavra; (B) detalhe da estratificação da fácies *mudstone* transicional. A flecha amarela indica a escala.

Essa fácies na base do Intervalo 5, compreende o limite da lavra devido ao aumento do aporte silicoso nas rochas. No testemunho se observam os intervalos silicosos; ocorrem intercalações siltico-argilosas (cinza claro) e também carbonosas (cinza escuro), desde gradacionais a aparentemente mais abruptas (FIGURA 55).



FIGURA 55 – Observação mesoscópica das laminações.

Descrição Petrográfica

○ *Amostra de mudstone transicional F6 28B*

Ocorrem laminações micríticas intercaladas com laminações milimétricas de material argiloso escuro criptocristalino (FIGURA 56A). Ocorrem junto às laminações argilosas, estilólitos submilimétricos discordantes ou verticais ao acamamento (FIGURA 56B). Ainda nas laminações argilosas, ocorre quartzo microcristalino distribuído irregularmente nas bordas.

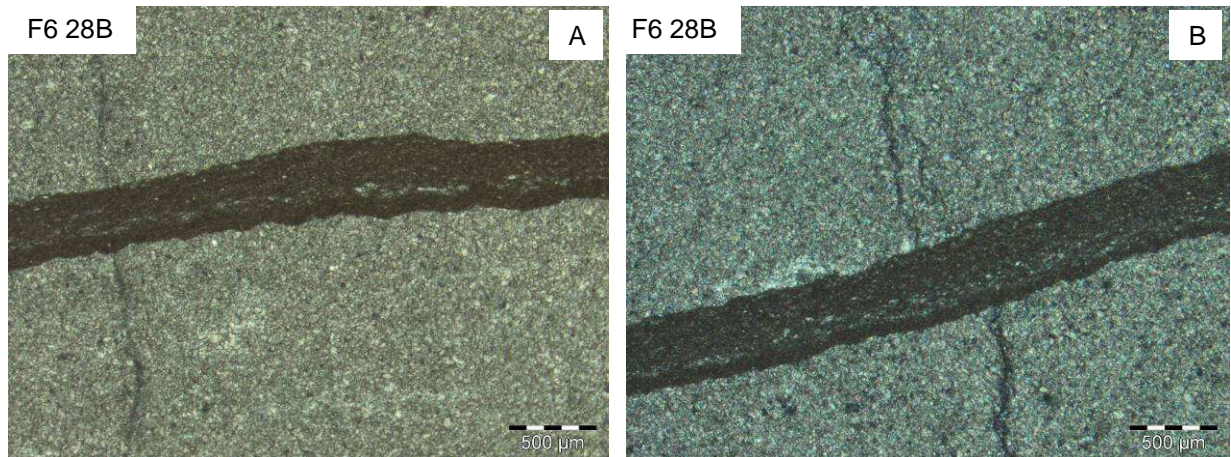


FIGURA 56 – (A) Laminação argilosa criptocristalina intercalada no acamamento micrítico, sob nicóis paralelos; (B) estilólitos discordantes cortando a laminação argilosa, sob nicóis cruzados.

4.7 FACIOLOGIA DO INTERVALO 6

O Intervalo 6 denominado “silicoso de base” pela mineração (FIGURA 57), é o intervalo através do qual não ocorre mais aproveitamento do calcário e é descrito apenas no Furo CSNMA-07-006, até atingir abruptamente tanto o diamictito basal quanto o embasamento, em uma espessura de 20 m. Esse intervalo configura-se como a continuação da intercalação das margas microcristalinas de coloração cinza claro, com lentes carbonosas escuras.

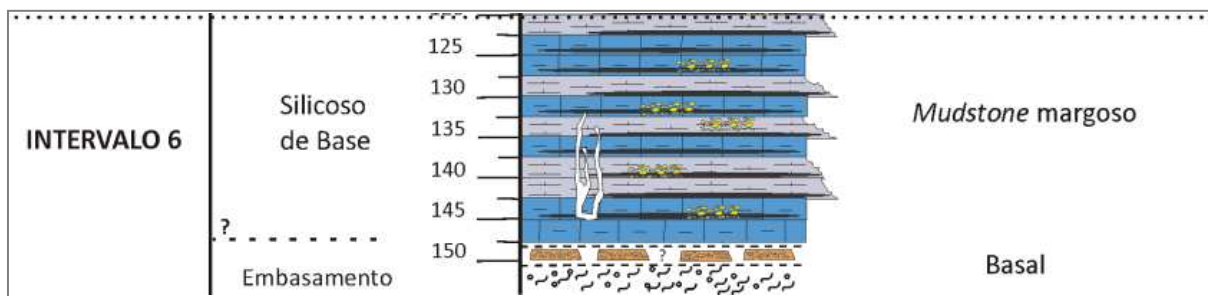


FIGURA 57 – Detalhe do Intervalo 6, com a denominação utilizada na mineração e as fácies encontradas.

4.7.1 Fácies *Mudstone* Margoso

Esse intervalo compõe-se da fácies *mudstone* margosa intercalada com estratificações argilo-carbonosas. Na profundidade de aproximadamente 125 m, as laminações argilo-carbonosas ocorrem de maneira frequente e gradacional, como pode ser observado na FIGURA 58A. Conforme se avança em direção à base, essa

passa de laminações a estratificações centimétricas, quase abruptas, com a fácies *mudstone* margosa, como pode ser observado na FIGURA 58B. Em algumas porções a marga apresenta níveis com coloração mais clara e cristalização mais grossa, mas ainda submilimétrica. Foram descritas duas lâminas, uma da fácies *mudstone* margosa e outra da intercalação dessa fácies com o nível argiloso.



FIGURA 58 – (A) Intercalação gradacional da fácies *mudstone* margosa com as laminações argilo-carbonosas; (B) estratificações argilo-carbonosas contínuas e abruptas com o *mudstone* margoso.

Descrição Petrográfica

○ *Amostra mudstone margoso F6 31B*

Ocorrem níveis carbonáticos homogêneos e heterogêneos mais límpidos, de granulação maior e se observam laminações argilosas escuras. Ocorrem ocasionais gradações granulométricas nos níveis homogêneos e essa variação parece ser dividida por um estilólito submilimétrico (FIGURA 59A). O nível de maior cristalinidade é o que possui estruturas peloidais reliquias. Ocorrem ainda intraclastos micritizados reliquias de até 500 μ , em meio aos estilólitos com porções argilosas. Observam-se opacos dispersos na matriz. O nível carbonático no qual se desenvolve melhor a cristalização é um nível oolítico reliquiar (FIGURA 59B). Em algumas porções recristalizadas ocorrem nódulos com quartzo microcristalino.

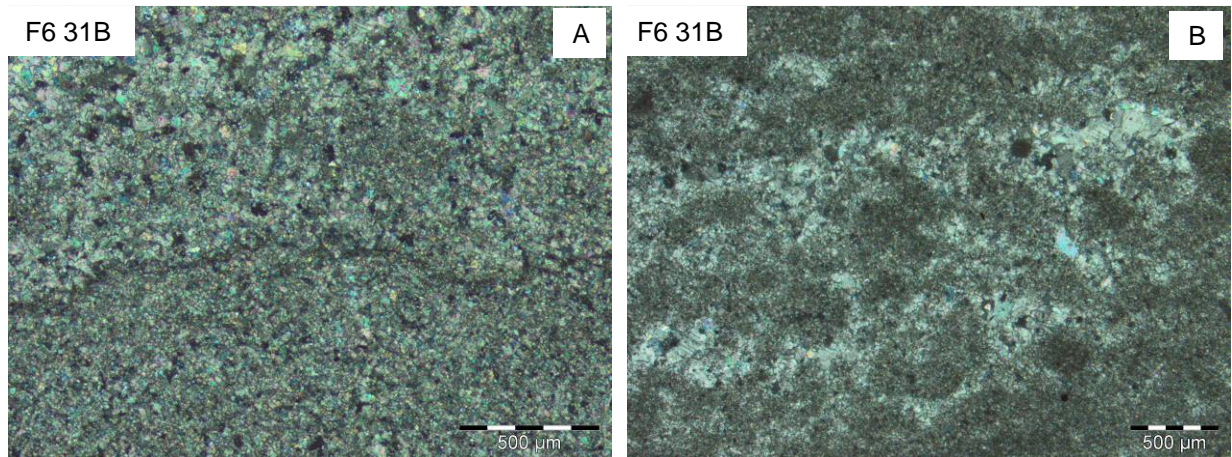


FIGURA 59 – (A) Diferentes granulações aparentemente separadas por estilólito submilimétrico, sob nicóis cruzados; (B) cristalização espática preferencial no nível oolítico micritizado, sob nicóis cruzados.

○ *Amostra de mudstone margoso intercalado com nível argiloso F6 35A*

Observa-se intercalação de níveis carbonáticos micríticos (FIGURA 60A) com níveis mais argilosos amarronzados, lembrando ritmitos. Na porção superior ocorre uma fina laminação de quartzo microcristalino, sendo que o quartzo também ocorre em agregados límpidos em meio às porções argilosas.

As porções argilosas parecem ter uma direção preferencial de deposição (FIGURA 60B), oblíqua ao acamamento, que pode ser indicativo de esforço superimposto, com pequenos fraturamentos associados que sugerem acomodações, resultando em fraturas milimétricas preenchidas por óxidos.

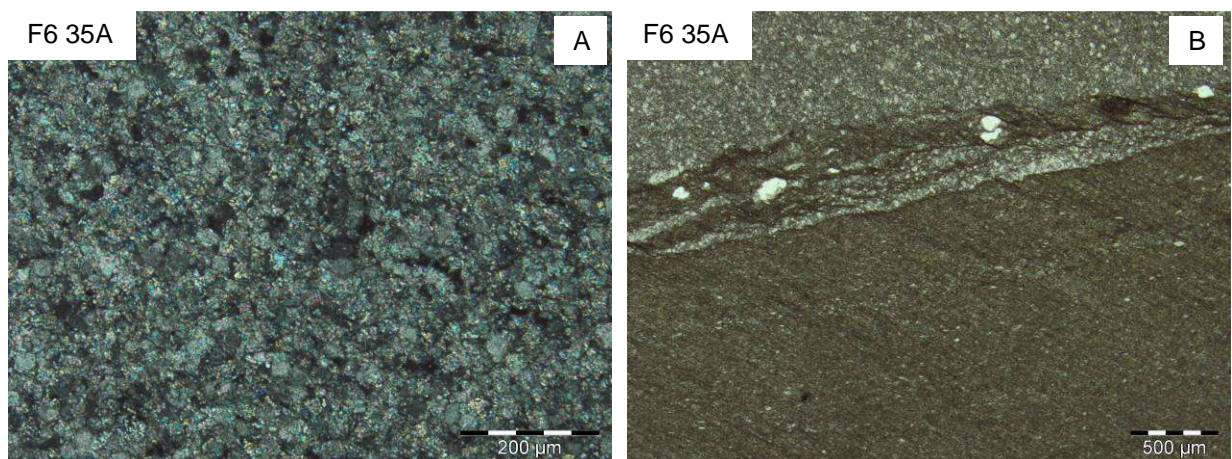


FIGURA 60 – (A) Acamamento micrítico carbonático homogêneo, sob nicóis cruzados; (B) nível argiloso em contato gradacional com o nível micrítico, sob nicóis paralelos.

4.7.2 Fácies Basal

Essa fácies não é alvo direto de estudo dessa pesquisa, porém devido à sua importância para correlações regionais, far-se-á uma breve caracterização dos litotipos encontrados, ressaltando que análises geoquímicas não foram executadas nessas amostras.

Na profundidade de 144 m, começa abruptamente um diamictito polimítico (FIGURA 61A e 61B), indicado pela seta branca, inicialmente com clastos dispersos em meio a um calcilutito preto estratificado, com pirita, aparentemente a mesma rocha descrita na fácies *mudstone* margosa. Segue-se um calcário cristalino impuro, indicado pela seta vermelha (FIGURA 61A e 62A), que abruptamente mostra um fraturamento irregular com quartzo leitoso mesocristalino associado e, por fim, ocorre também de maneira abrupta, um quartzo-biotita-estaurolita xisto, indicado pela seta amarela (FIGURA 61B).

O diamictito possivelmente é correlato ao diamictito basal descrito para a Formação Jequitaí, anterior à deposição do Grupo Bambuí (FIGURA 61A e 62B). É curioso atentar para o fato de que Kuchembecker (2011) encontrou essa mesma sucessão de rochas na sua localidade de estudo, porém o calcário cristalino impuro (Unidade 2 do autor) é descrito acima do diamictito, e não abaixo do mesmo, como ele é observado na Mineração Bocaina.

O quartzo-biotita-estaurolita xisto (FIGURA 62B) é provavelmente constituinte da Megassequência Espinhaço, considerada embasamento da Formação Jequitaí e do Grupo Bambuí.

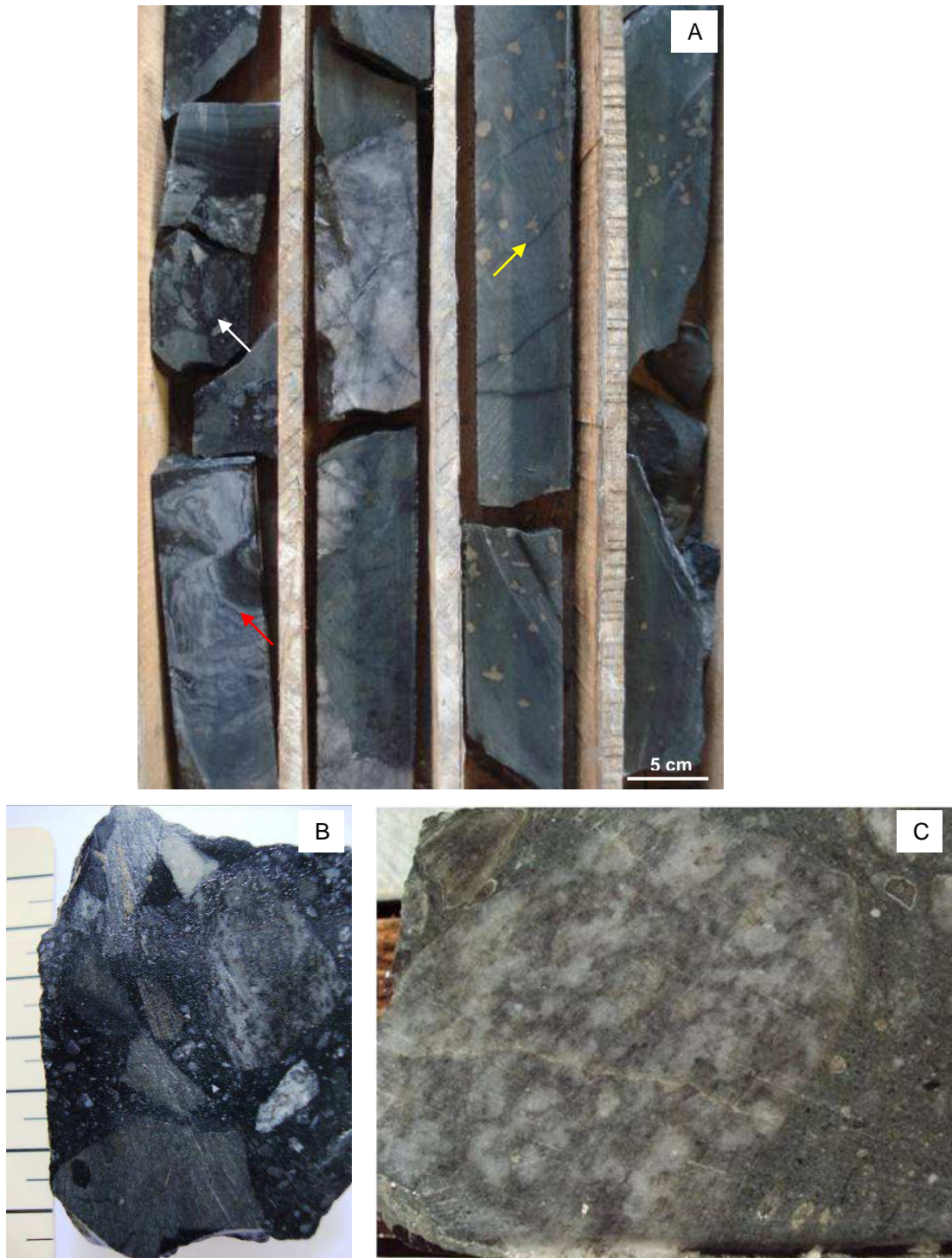


FIGURA 61 – (A) Rochas basais distintas às rochas carbonáticas; a seta branca indica o diamictito polimítico, a seta vermelha indica o calcário cristalino impuro e a seta amarela indica o xisto. (B) Diamictito observado na Mineração Bocaina, com escala centimétrica; (C) diamictito descrito por Kuchembecker (2011).

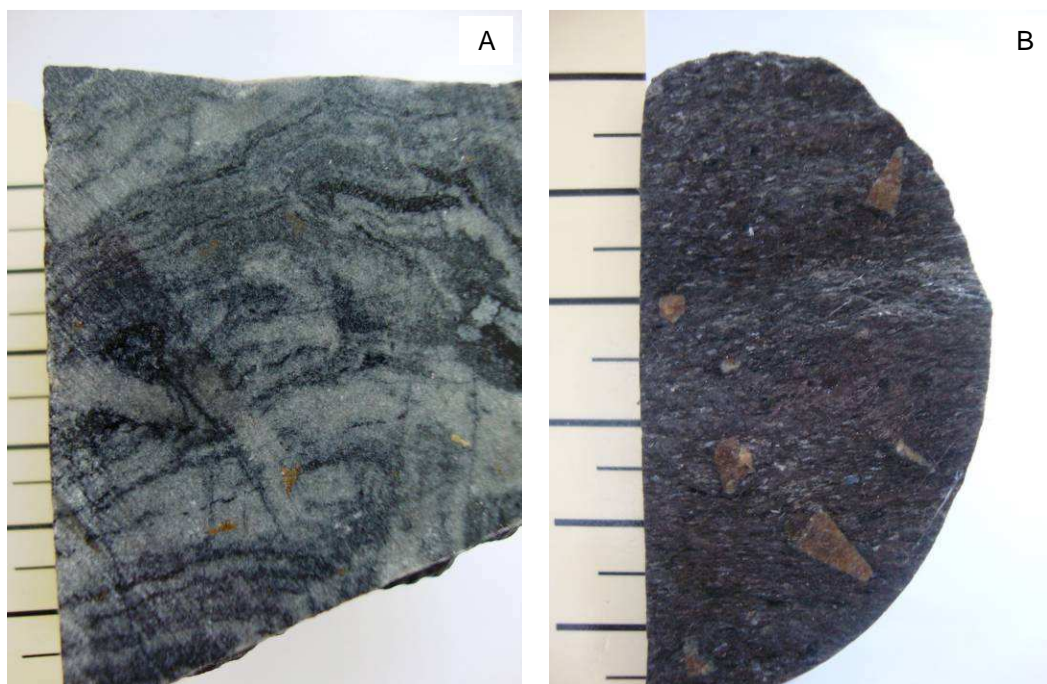


FIGURA 62 – (A) Detalhe do calcário cristalino impuro em seção longitudinal e (B) detalhe do xisto do embasamento, em seção transversal; em ambas as imagens a escala é centimétrica.

Descrição Petrográfica

No diamictito – amostra 37 A, observa-se uma matriz arcoseana inequigranular com muscovita; ocorrem grãos microcristalinos a centimétricos, angulosos de quartzito e granitóides (FIGURA 63A).

No calcário cristalino impuro – amostra 37 B, os cristais carbonáticos são frequentemente serrilhados, anédricos, ocasionalmente mostram extinção ondulante indicando deformações na estrutura. Observa-se uma matriz opaca com argilominerais e grãos diversos concentrados e estilólitos freqüentes (FIGURA 63B).

No quartzo-biotita-estaurolita xisto (FIGURA 63C), observa-se textura lepidoblástica, sub-grãos de quartzo e cristais subédricos de estaurolita (FIGURA 63D) crescidos em meio à foliação, com inclusões de opacos, aparentemente sintectônicos.

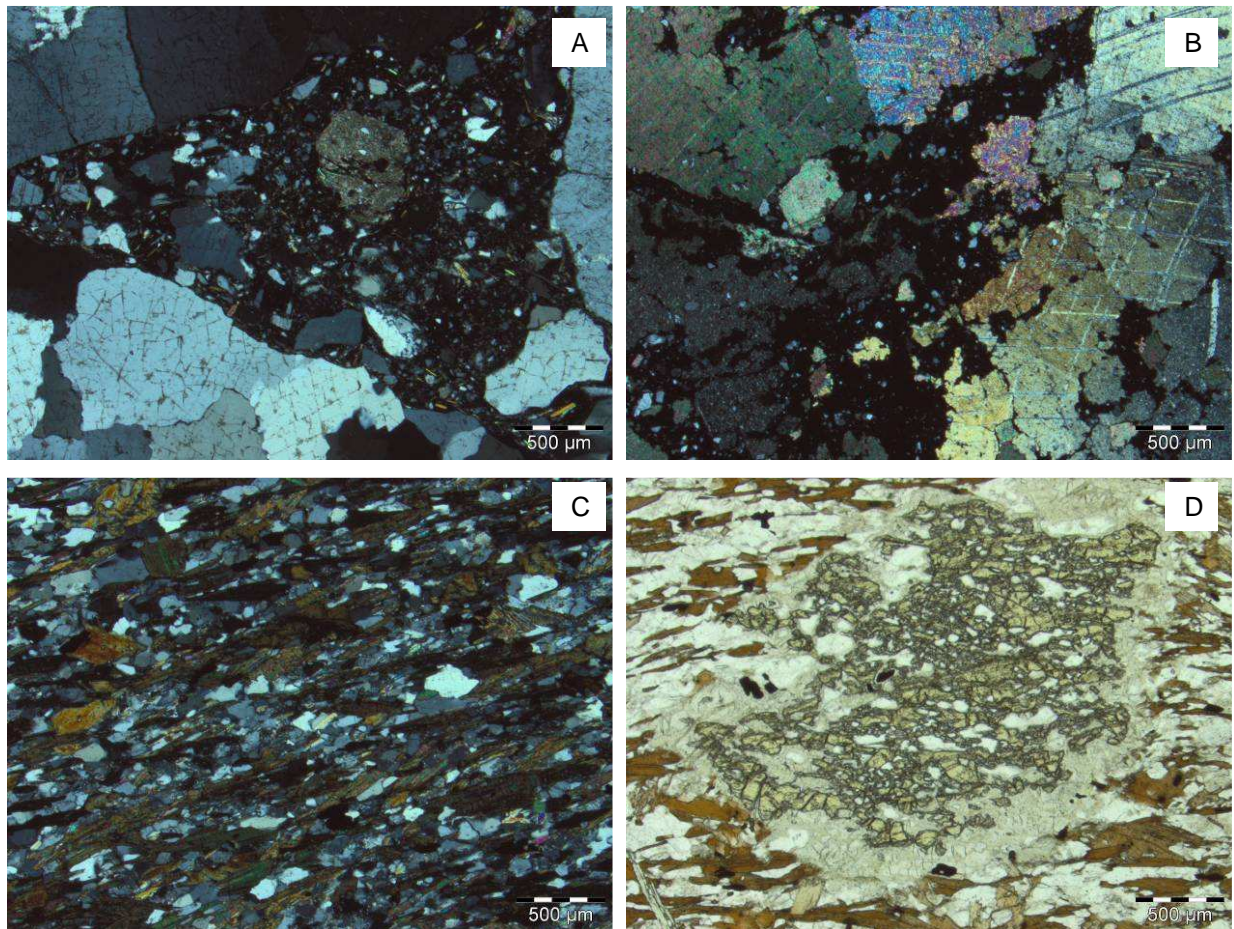


FIGURA 63 – (A) Matriz arcoseana do diamictito, sob nicóis cruzados; (B) material opaco concentrado em meio aos cristais anédricos, sob nicóis cruzados; (C) foliação principal e sub-grãos de quartzo, sob nicóis cruzados; (D) detalhe do cristal de estauroлита em meio à foliação, sob nicóis paralelos.

5 QUIMIOESTRATIGRAFIA NA MINERAÇÃO BOCAINA

Empregar a quimioestratigrafia na mineração visa comparar os intervalos de exploração atualmente aceitos com as variações geoquímicas encontradas, a partir de uma amostragem controlada e sistemática. As análises geoquímicas obtidas nas amostras do furo-guia ou testemunho de sondagem CSNMA-07-006, podem ser melhor visualizadas na forma de gráficos, acompanhando em profundidade a seção faciológica (FIGURAS 64 a 68, nas páginas seguintes). Os gráficos foram elaborados com base nas análises de amostras coletadas ao longo do testemunho, de todos os intervalos descritos no Capítulo 4. As tabelas com todos os dados analíticos químicos e mineralógicos compõem os Apêndices.

Os Intervalos pré-determinados pela mineração foram comparados aos perfis geoquímicos obtidos de: elementos maiores, elementos-traço, mineralogia, razões elementares e isotópicas. Enquanto há seis intervalos litogeoquímicos usados na exploração da mineração, verificou-se a existência de onze fácies sedimentares distintas, que foram descritas no Capítulo 4, e de cinco unidades geoquímicas.

As unidades geoquímicas foram classificadas de “A” a “E” e foram assim denominadas com base nos intervalos distintos em profundidade, mas que são quimicamente, mineralogicamente e/ou isotopicamente correlacionáveis. Os intervalos estão identificados e podem ser comparados às unidades, delimitados por linhas tracejadas, enquanto as unidades geoquímicas estão identificadas com letras maiúsculas e tiveram seus intervalos de ocorrência coloridos.

Comparar os intervalos pré-existentes utilizados na exploração com as novas unidades geoquímicas propostas, permite verificar se o controle geoquímico para a exploração do material é satisfatório, segundo a demanda e especificações da empresa, ou se não podem ser pensadas melhorias e modificações na lavra, para aproveitamento de algum intervalo, ou parte do mesmo, que até então não se explora.

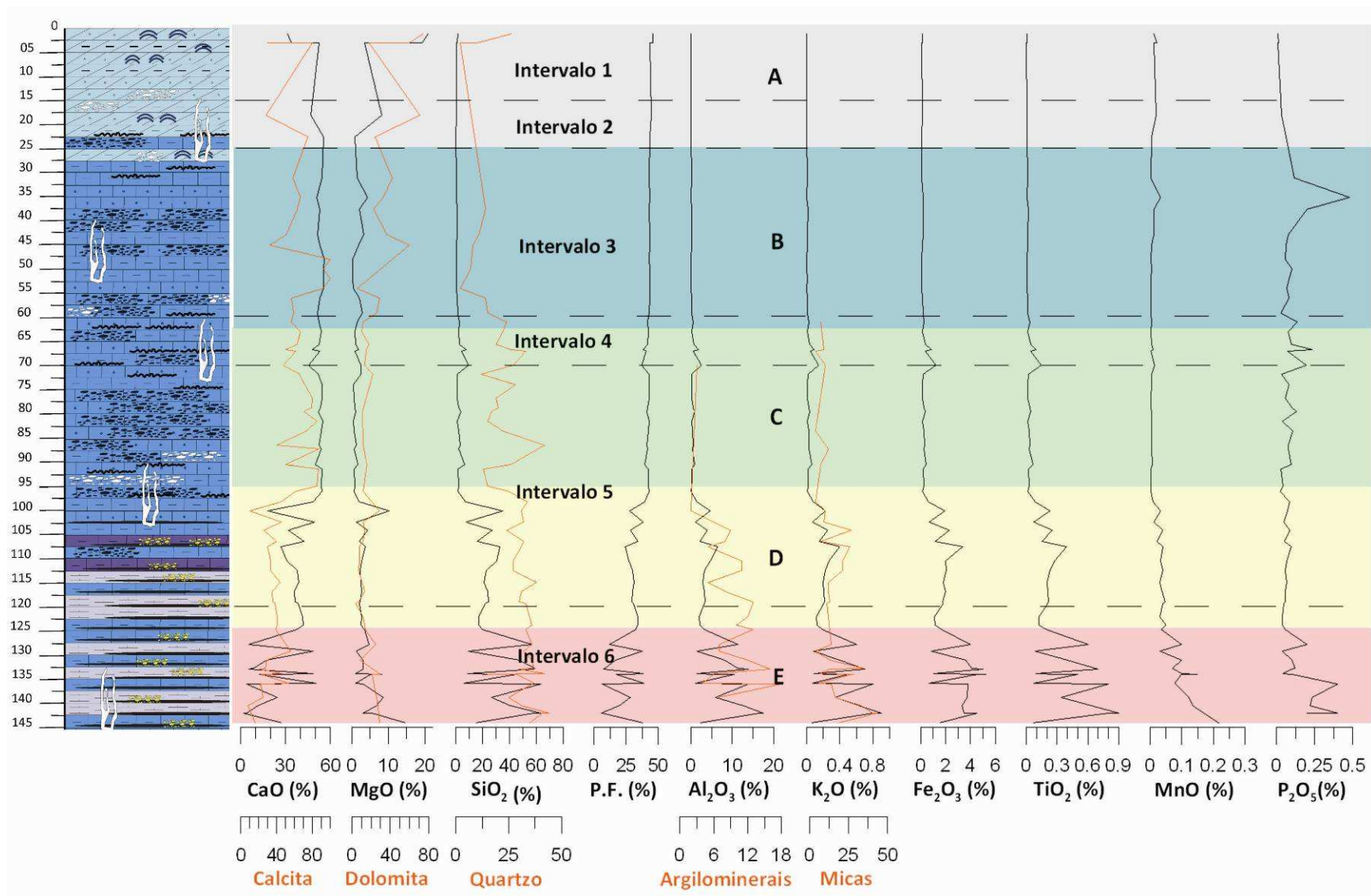


FIGURA 64 – Perfis das unidades geoquímicas para as rochas do furo-guia (CSNMA-07-006), com dados químicos e mineralógicos.

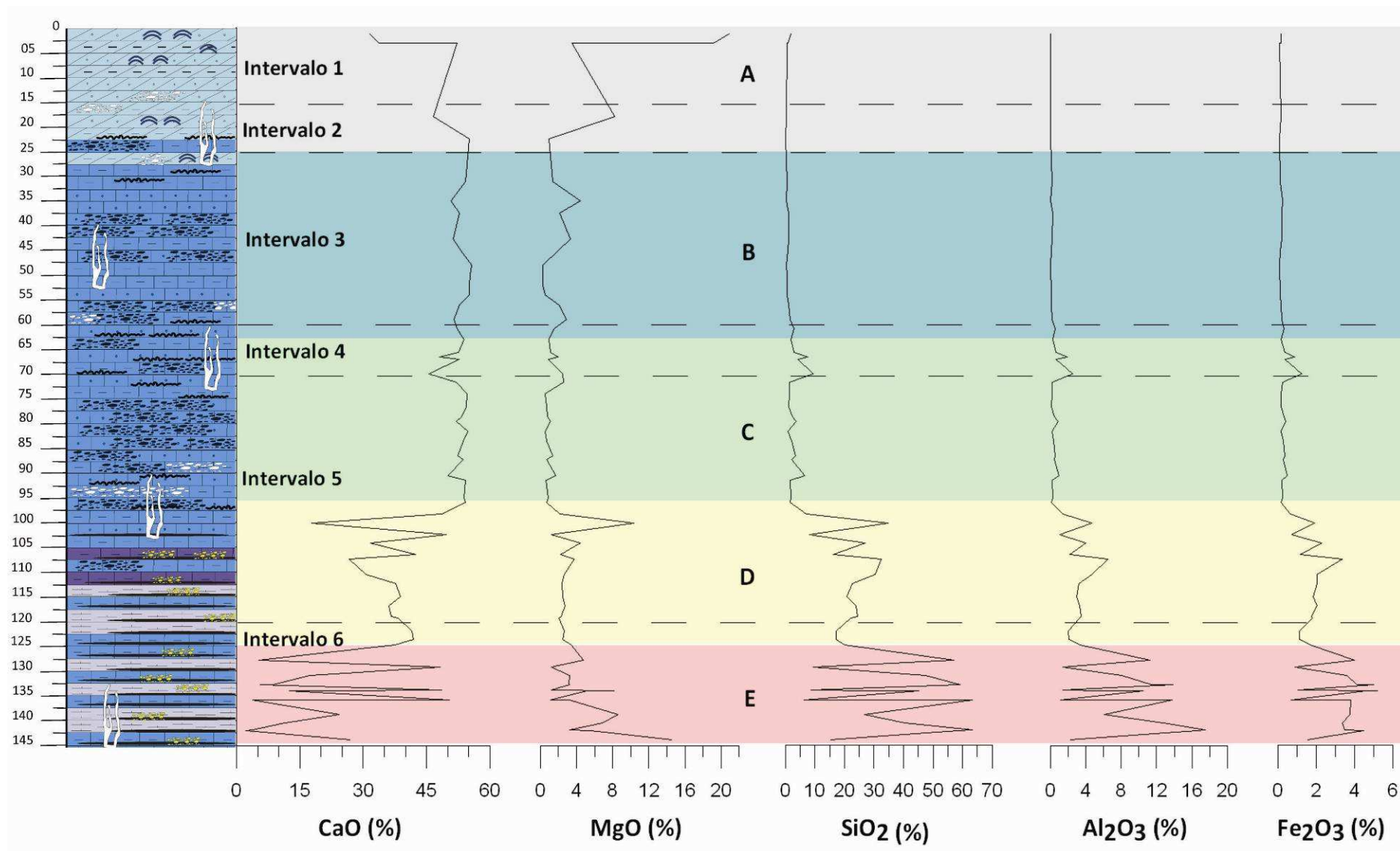


FIGURA 65 - Perfis das unidades geoquímicas para as rochas do furo-guia (CSNMA-07-006), com dados de elementos maiores.

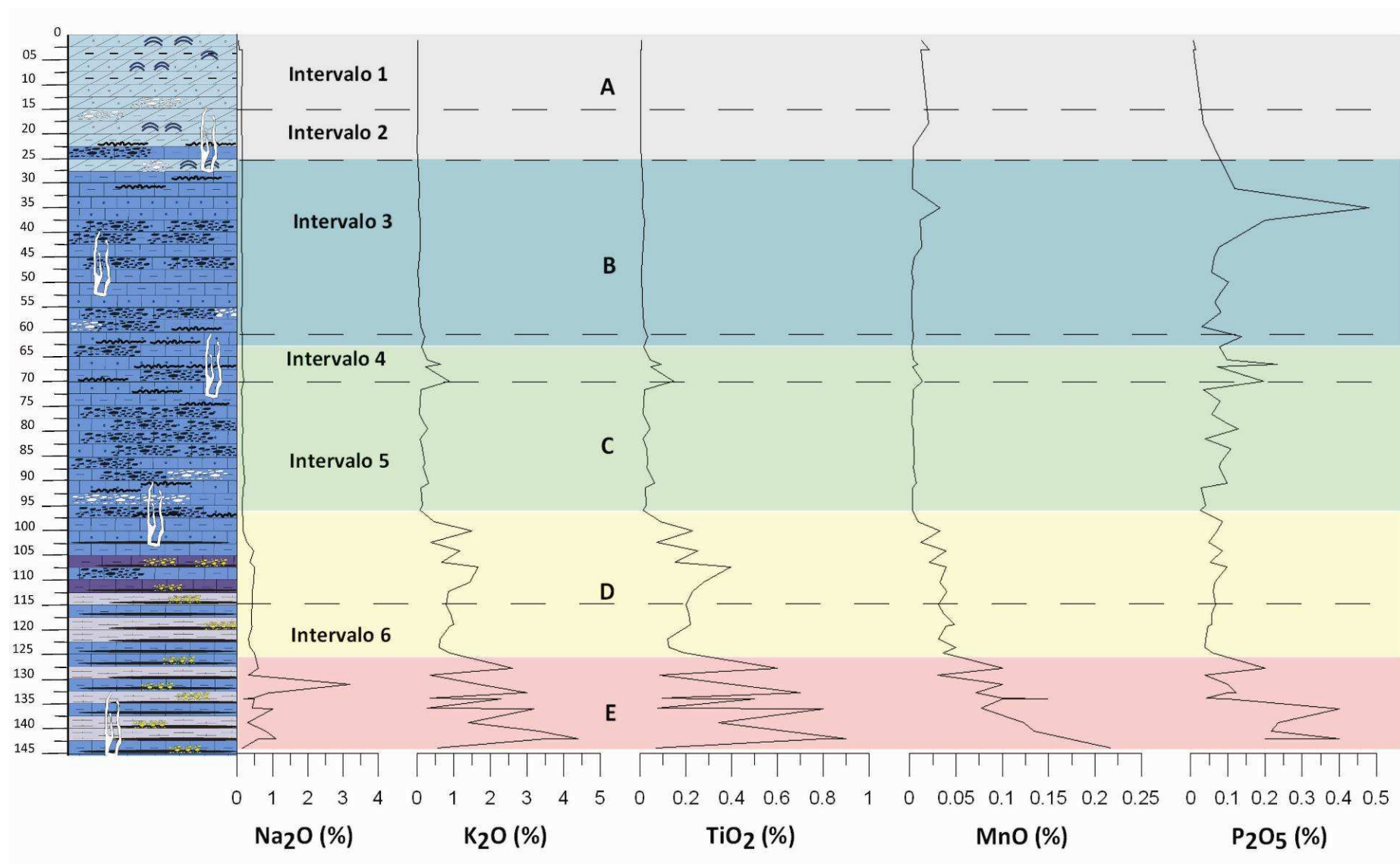


FIGURA 66 – Perfis das unidades geoquímicas para as rochas do furo-guia (CSNMA-07-006), com dados de elementos maiores.

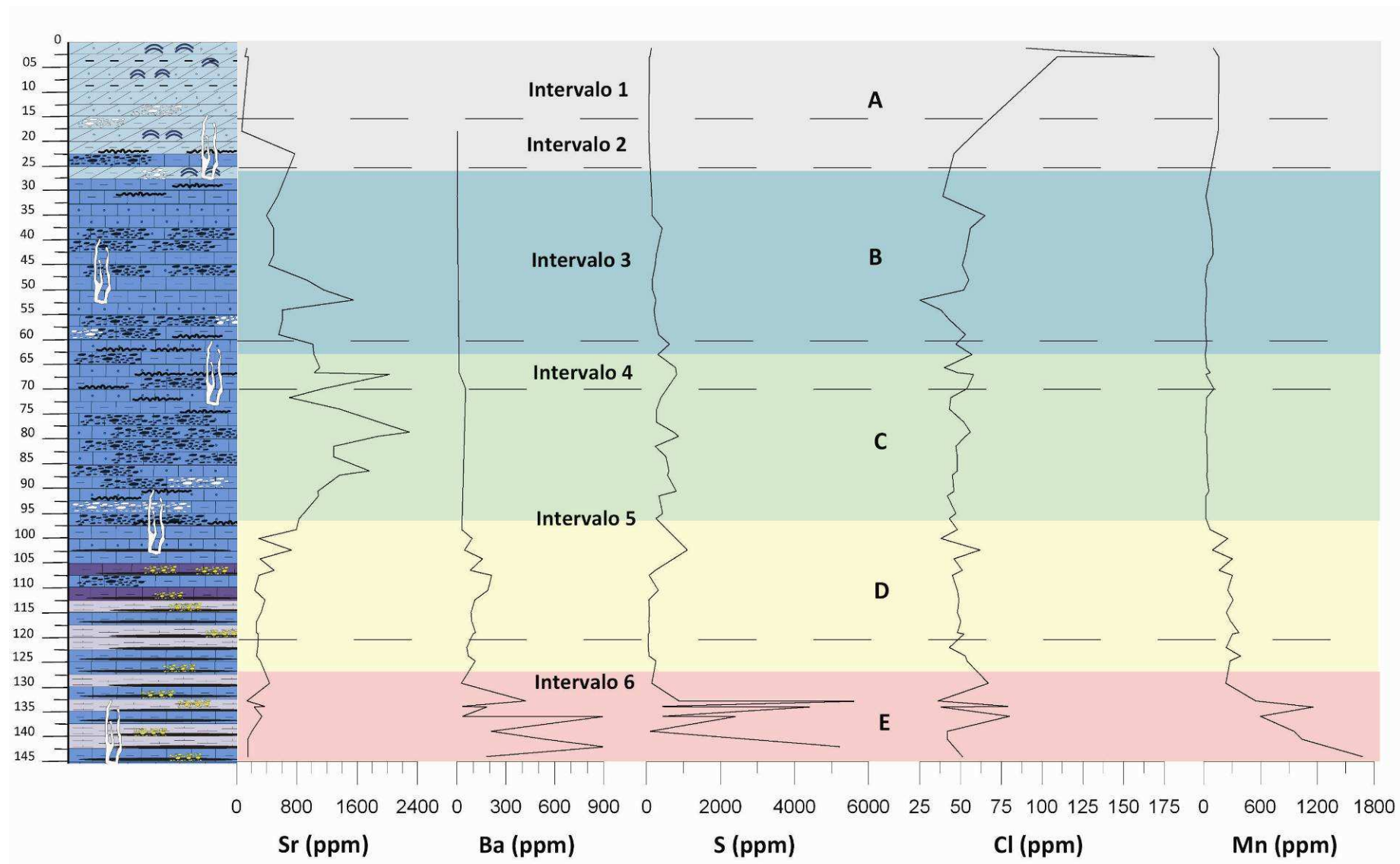


FIGURA 67 – Perfis das unidades geoquímicas para as rochas do furo-guia (CSNMA-07-006), com dados de elementos-traço.

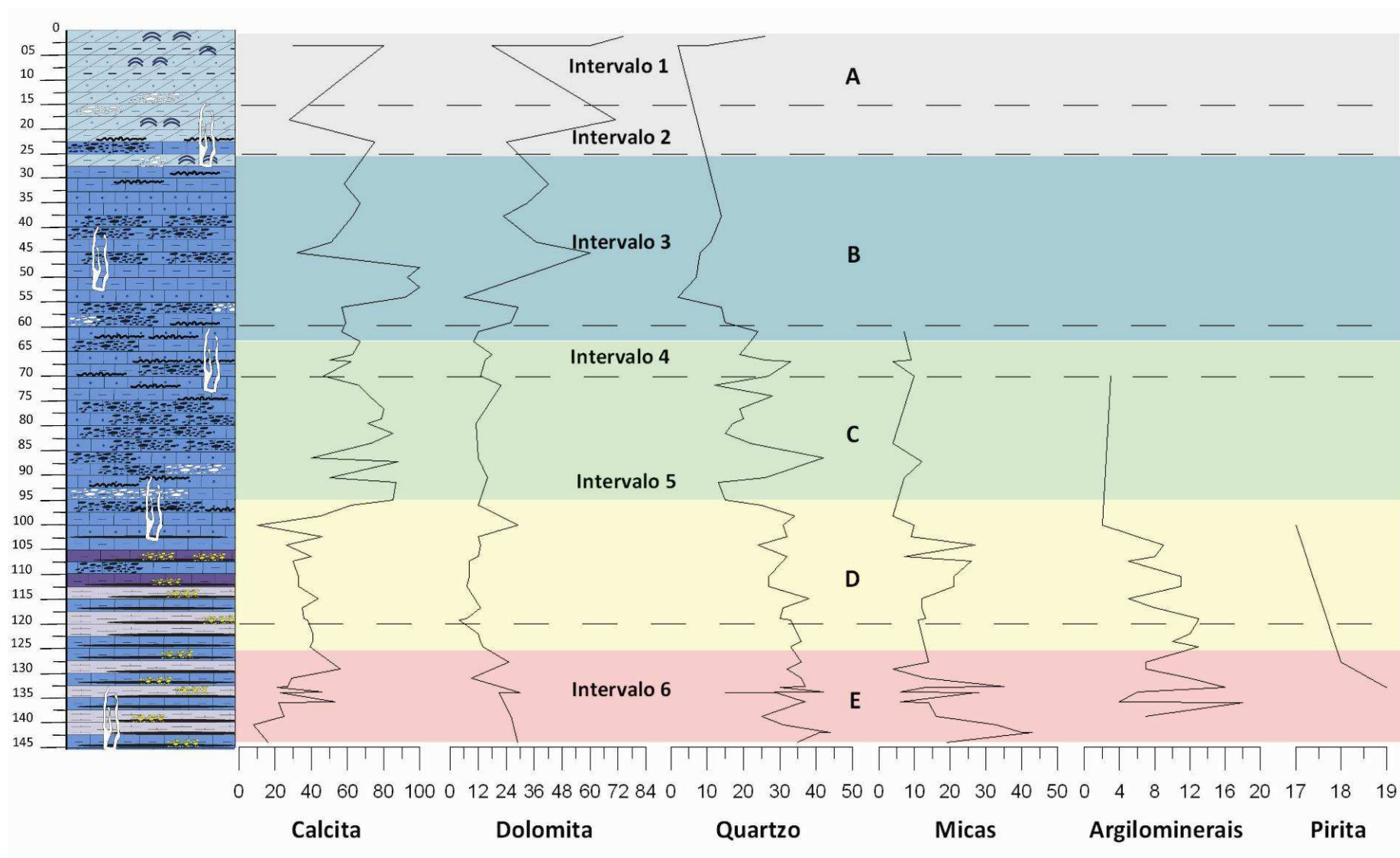


FIGURA 68 – Perfis das unidades geoquímicas para as rochas do furo-guia (CSNMA-07-006), com dados de mineralogia, por quantificação da difração de raios X.

5.1 UNIDADE GEOQUÍMICA A

A primeira unidade geoquímica (colorida em cinza) abrange os Intervalos 1 e 2 da mineração, ocorrendo ao longo de aproximadamente 25 m de profundidade. Essa unidade compõe-se de rochas dolomíticas com abundância de construções estromatolíticas. Os dois intervalos foram reunidos numa mesma unidade por apresentarem picos de heterogeneidades semelhantes ao longo dos diferentes testemunhos, até aproximadamente 25 m de profundidade.

Além de amostragem dessa unidade ao longo de aproximadamente vinte e três metros contínuos no furo-guia (CSNMA-07-006), foi feita amostragem em aproximadamente nove metros do testemunho CSNMA-07-001, em seis metros do testemunho CSNMA-07-0016 e em nove metros do testemunho CSNMA-07-0019 (FIGURA 69). Os gráficos dos resultados obtidos nos testemunhos complementares ao furo-guia se encontram nas FIGURAS 71, 72 e 73. Seus resultados estão especificados através dos gráficos para cada testemunho.

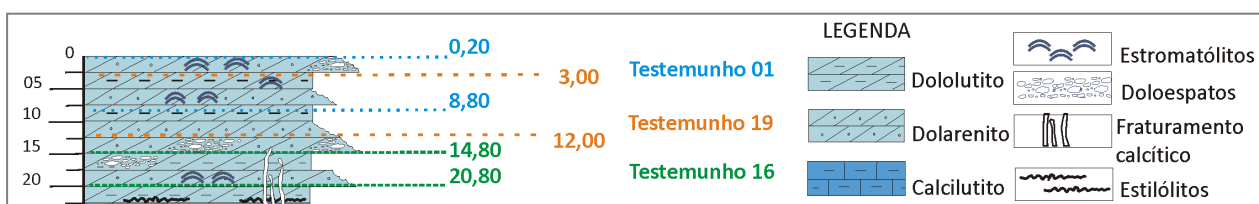


FIGURA 69 – Correspondência, em profundidade e faciologia, dos intervalos de rochas amostrados nos diferentes testemunhos, tendo como base o furo-guia, ilustrado.

Observando os resultados e a área de ocorrência dessa unidade nos gráficos quimioestratigráficos, observam-se comportamento geoquímicos diferentes nos quatro testemunhos. Tem-se, nas rochas do furo-guia, valores médios para o CaO de menos de 50% e de MgO em torno de 10%. Esses valores são os mais contrastantes, se comparados aos valores das rochas dos demais testemunhos, mais homogêneos (em média com 30% de CaO e 17% de MgO).

A SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 permanecem homogêneos ao longo dos testemunhos, aumentando de maneira conjunta e significativa no testemunho CSNMA-07-0019. Valores de SiO_2 que antes mantinham-se entre 1 – 2% saltam para 24% e o Al_2O_3 antes em torno de 0,1%, aumenta para até 3,47%. Essas variações (FIGURA 70) podem indicar que, lateralmente, fatores ambientais primários ou fatores modificadores atuaram de maneira heterogênea sobre essas rochas.

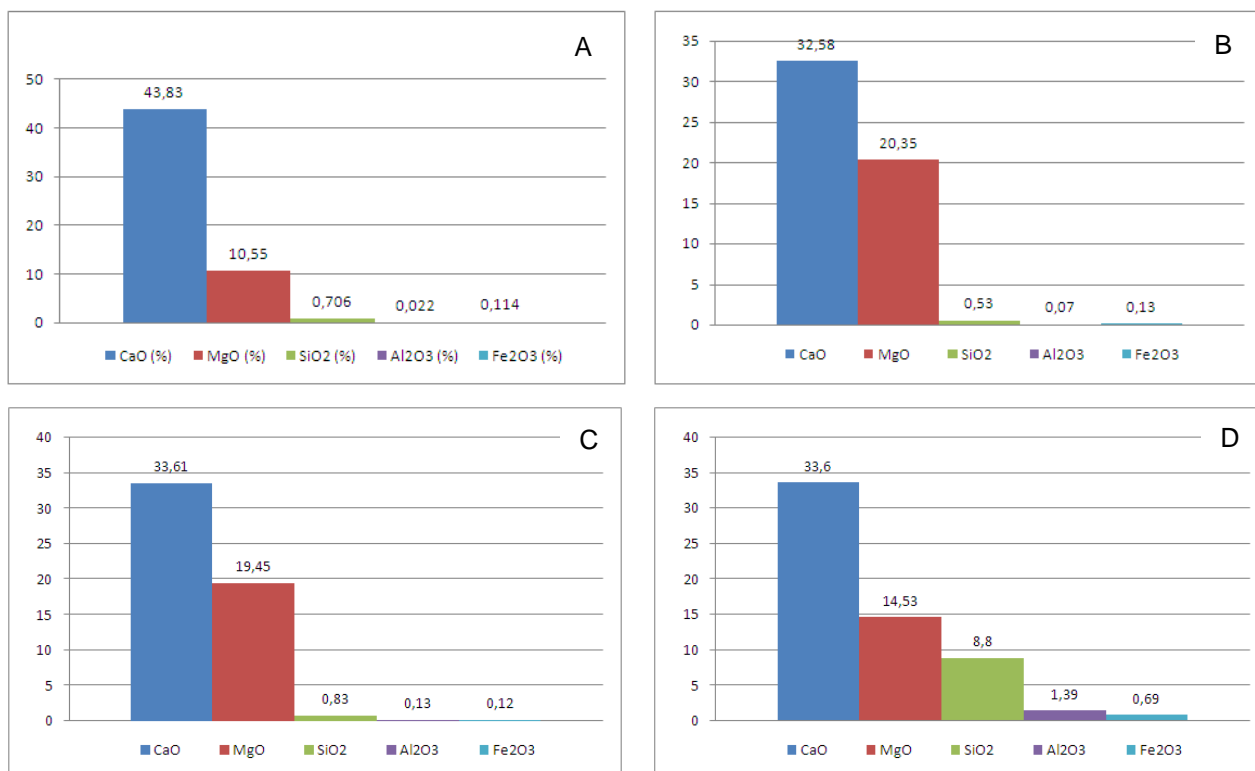


FIGURA 70 – Gráficos das médias dos principais óxidos nas rochas do furo-guia (A); testemunho CSNMA-07-001 (B); testemunho CSNMA-07-0016 (C); testemunho CSNMA-07-0019 (D).

Os horizontes magnesianos, no furo-guia, variam desde <1% até 20%, no topo (2 m iniciais) enquanto que os cálcicos variam de 31 a 55%. No testemunho 001 o MgO é praticamente constante próximo de 20%, ocorrendo aumento do cálcio em aproximadamente 6 m de profundidade, para 35%. No testemunho 0016 o CaO mantém-se em 34%, decrescendo para 31% aos 18 m; o MgO mantém-se em 19%, com aumento para 21% quando o CaO decresce. No testemunho 0019 há um horizonte com aproximadamente 22% de MgO bem demarcado aos 8 m de profundidade, no qual o CaO decresce para 30%. Em 12 m de profundidade, o CaO aumenta novamente (36,5 – 38%) enquanto o MgO diminui para aproximadamente 2%.

Os teores de sílica, alumínio e ferro do furo-guia, são maiores no extremo topo da sequência, diminuindo em direção à base. Já para os valores de P_2O_5 , observa-se aumento em direção à base.

No testemunho 001, quando diminui o MgO verifica-se diminuição da SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O e Fe_2O_3 . No testemunho 0016 o conteúdo de Al_2O_3 e K_2O aumenta juntamente com o aumento da SiO_2 e com a diminuição do MgO. No testemunho

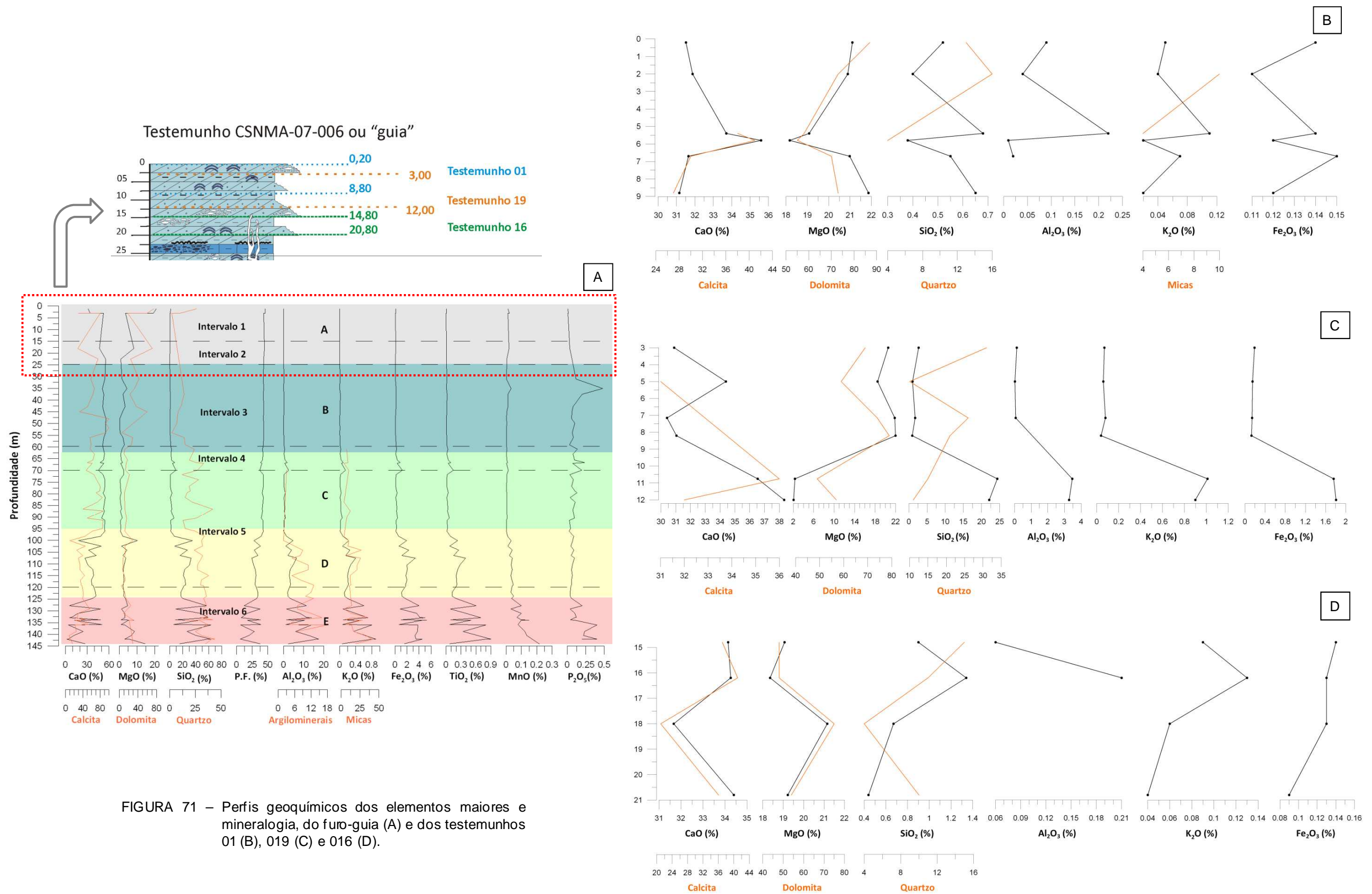
0019, quando o ocorre a queda do MgO para verifica-se comportamento contrário da SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O e Fe_2O_3 .

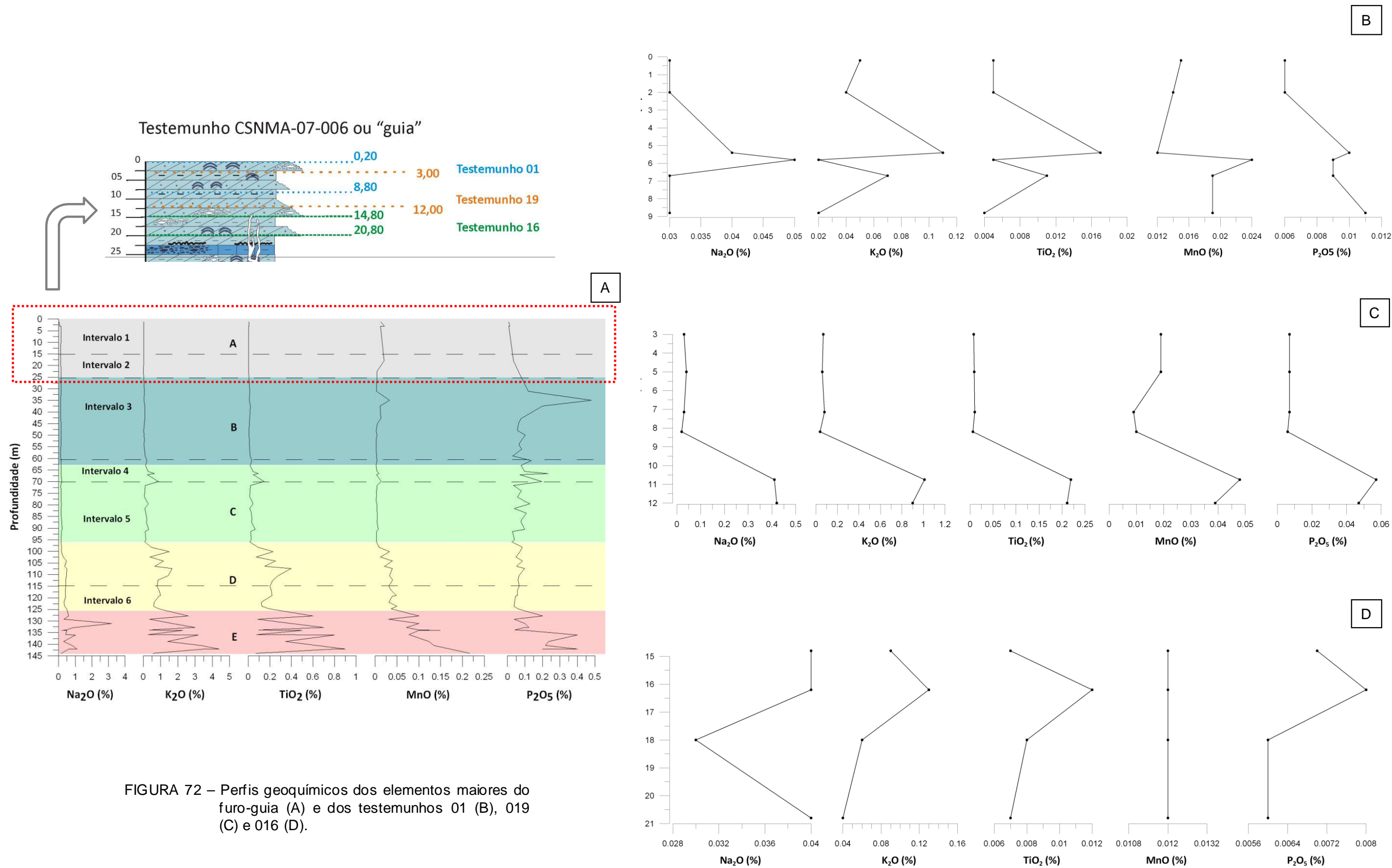
Os teores de Na_2O , TiO_2 , MnO e P_2O_5 , para os testemunhos 001 e 0019, mostram melhor correlação. No primeiro, enquanto Na_2O e MnO aumentam proporcionalmente, diminuem TiO_2 e P_2O_5 . No segundo, todos aumentam proporcionalmente, junto com o K_2O . No testemunho 0016, os teores de TiO_2 e P_2O_5 variam proporcionalmente junto com o K_2O e o MnO mantém-se constante em 0,012%.

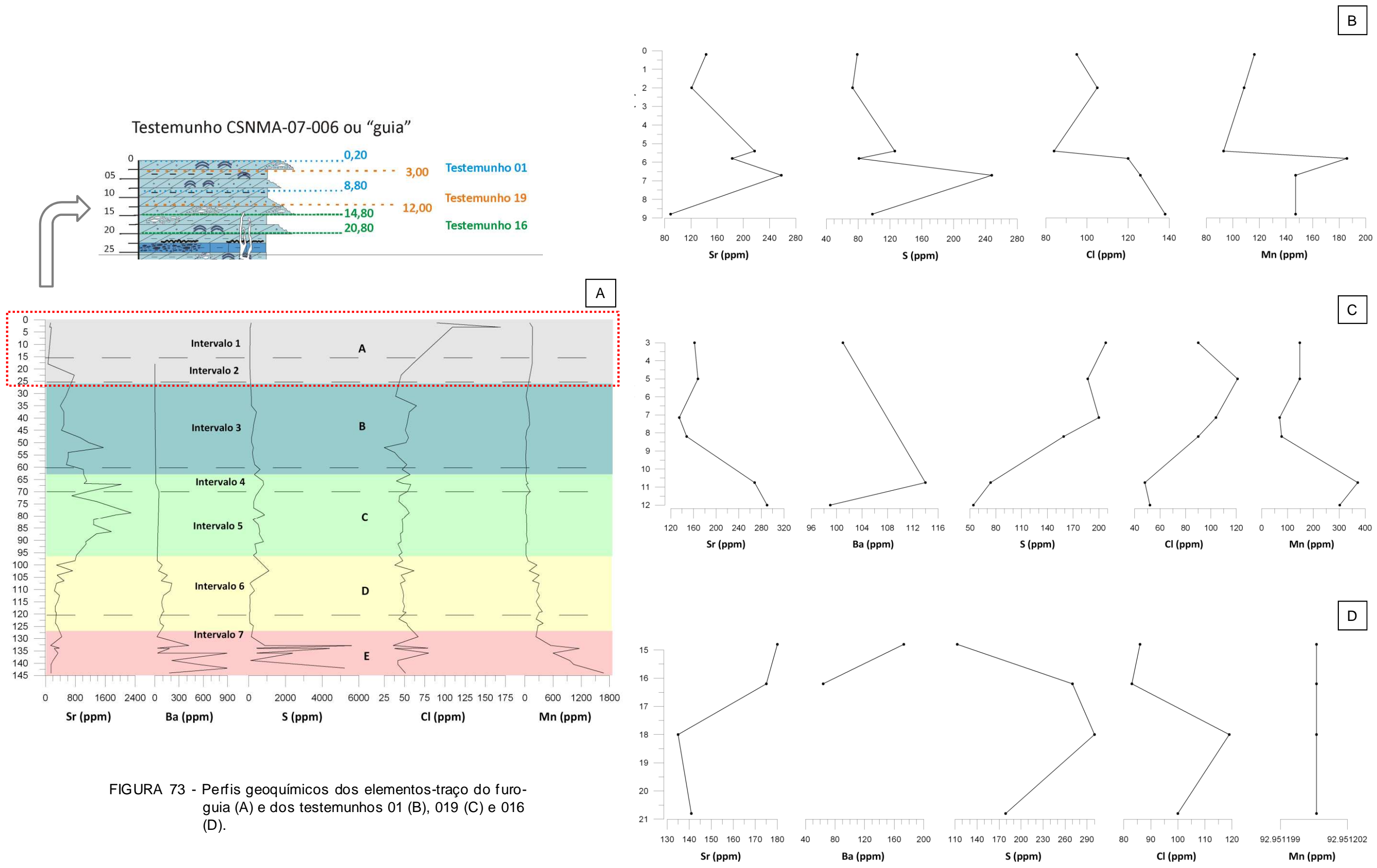
Quanto aos elementos-traço, para o furo-guia, observa-se que ocorre o aumento de estrôncio juntamente com o aumento do teor de cálcio na base da unidade. O Sr que mantinha-se em média 120 ppm, salta para mais de 700 ppm. O manganês é constante nessa unidade, com valores próximos a 150 ppm que diminuem em direção à base, e o enxofre inicia-se nos dois primeiros metros em 126 ppm, diminuindo e mantendo-se constante em aproximadamente 80 ppm. O cloro atinge seus maiores valores no topo da unidade, provavelmente devido à proximidade superficial, diminuindo gradativamente em direção à base.

No testemunho 001, o Sr e o S aumentam proporcionalmente, enquanto que o Cl e o Mn parecem diminuir de maneira conjunta. Nos testemunhos 0016 e 0019, há grande dispersão de valores, sendo que no primeiro, o Sr e o Cl variam inversamente proporcionais e no segundo, o Sr e o Mn variam juntamente.

Essas variações químicas observadas através dos gráficos são coerentes com as mineralogias obtidas para os testemunhos dessa unidade, de calcita, dolomita e quartzo.







5.2 UNIDADE GEOQUÍMICA B

A segunda sequência geoquímica (colorida em azul) abrange o Intervalo 3 e o início do Intervalo 4 da mineração, ocorrendo por aproximadamente 37,50 m de profundidade. Compõe-se de teores praticamente constantes, exceto por um intervalo de 15 m com variações, observado entre 30 e 45 m de profundidade e um segundo intervalo menor, com 5 m, observado entre 55 e 60 m de profundidade. O primeiro denota dois horizontes magnesianos com boa correlação química entre os teores e o segundo, um horizonte magnesiano na base da sequência, sem correlações.

A variação média dos teores químicos pode ser observada na FIGURA 74; os teores de cálcio nessa unidade mantêm-se em aproximadamente 55%, diminuindo nos horizontes magnesianos para valores entre 50% e 51%. O magnésio se mantém constante com valores entre 0 e 3%, aumentando nos horizontes magnesianos para 3 a 4%. Observa-se que o manganês (em ppm) também se mantém constante, em aproximadamente 23 ppm, aumentando nesses horizontes para até 255 ppm.

Teores de sílica permanecem constantes entre 0,4 e 1%, aumentando incipientemente em direção à base, quando atingem até 2,83%. O alumínio e ferro mantêm-se geralmente entre 0,03 - 0,1% e 0,08 - 0,1%, respectivamente, mas em direção à base também aumentam de maneira gradativa e incipiente, o alumínio atinge até 0,58% e o ferro, 0,29%.

Teores de potássio e titânio evoluem de maneira semelhante com a sílica, alumínio e ferro. O potássio mantém-se constante com valores entre 0,03 – 0,09%, atingindo na base da unidade, 0,22%. O titânio é constante entre os valores de 0,006% e 0,0015%, atingindo na base 0,032%. O fósforo tem seu maior pico nessa unidade geoquímica.

O aumento nos teores de fósforo parece correlacionar-se com o aumento no teor de manganês e ocorre nos horizontes magnesianos. O fósforo apresenta variações com aumento dos teores ao longo da Unidade A, possuindo valores entre 0,007 – 0,062%. Na Unidade B atinge o valor máximo de 0,48%. Fora desses horizontes excepcionais, seus valores variam entre 0,03 e 0,1%.

Quanto aos elementos-traço, notam-se variações na quantidade de Sr. Inicialmente houve diminuição no conteúdo da Unidade A para a Unidade B. Na

Unidade B, o conteúdo mantém-se praticamente constante durante os horizontes magnesianos, com valores entre 396 e 429 ppm e apresenta leve aumento correlacionado ao aumento do cálcio, para 495 ppm. O pico máximo é evidenciado em aproximadamente 50 m de profundidade, atingindo 1553 ppm. Em direção à base da unidade, o Sr volta a diminuir para valores de aproximadamente 600 ppm até um segundo pico em 1000 ppm.

O cloro se mostra inversamente correlacionável ao Sr. Seu conteúdo aumenta durante os horizontes magnesianos, com valores entre 51 - 65 ppm e enquanto no Sr se observa o pico máximo, no cloro o pico é inverso, diminuindo para até 25 ppm. O enxofre é constante com valores entre 142 e 270 ppm, aumentando para até 422 ppm nos horizontes magnesianos. Mostra leve aumento em direção à base, onde atinge 619 ppm.

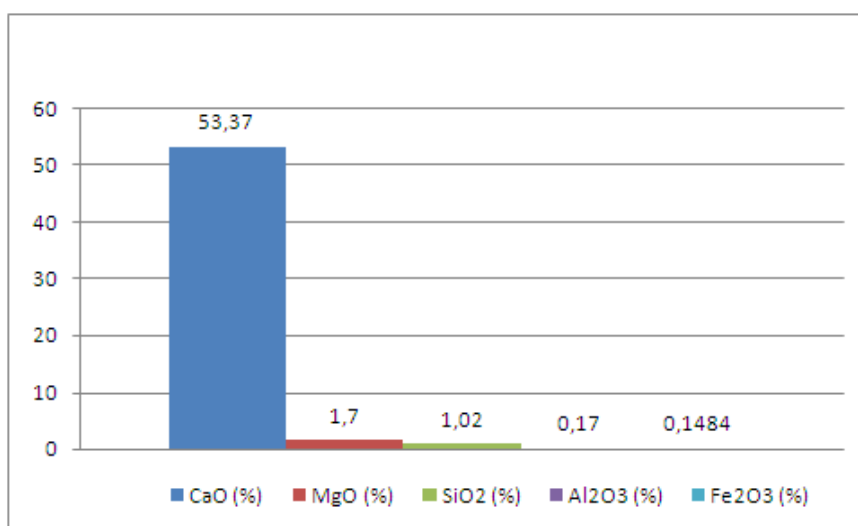


FIGURA 74 – Gráfico com as médias dos principais óxidos nas rochas do furo-guia, Unidade B.

A mineralogia para essa sequência se apresenta de maneira coerente à química, calcita, dolomita, quartzo e alguma mica. Os horizontes magnesianos estão evidenciados em dois picos com dolomita, com os quais a calcita aparece inversamente correlata. O quartzo aparece em direção à base, aumentando juntamente com a dolomita, conforme diminui a calcita. A mica começa a ser observada na porção extremamente basal.

5.3 UNIDADE GEOQUÍMICA C

A terceira unidade geoquímica foi colorida em verde claro e abrange o Intervalo 4 e metade do Intervalo 5 denominados na mineração, compreendendo aproximadamente 32 m. Os componentes predominantes são o cálcio, a sílica e correlatos. Horizontes com magnésio ainda são verificados em variações menores intercaladas que se tornam bem demarcadas no topo da unidade, dentro do Intervalo 4.

No topo da unidade, entre 65 m e pouco mais de 70 m de profundidade, observa-se uma variação entre os teores de cálcio e magnésio. As variações de composição são observadas na FIGURA 75. Acompanhando o aumento do magnésio, também se elevam a sílica, alumínio, ferro, potássio, titânio, manganês e fósforo. Valores de MgO próximos a 0,82% passam a 2,56%, ocasionando um horizonte magnesiano proeminente no limite do Intervalo 4 com o Intervalo 5. Ao mesmo tempo, o CaO que mantinha-se em 53%, diminui para 45%.

Os valores de sílica, alumínio e ferro parecem aumentar praticamente na mesma proporção nos horizontes magnesianos. O primeiro, antes com valores de no máximo 4% salta para 7,5 e 9,5%; o segundo, com pouca variação entre 0,13 e 0,68%, atinge 1,9 e 2,56% e o último, que se mantinha constante entre 0,14 e 0,35%, aumenta para 0,88 e 1,21%. No potássio e titânio se observam dois picos que mostram o aumento desses teores. O primeiro com valores próximos a zero aumenta, atingindo 0,64 e 0,87% e o segundo, com valores pouco maiores a 0,012%, atinge 0,093 e 0,145%.

Nos mesmos horizontes, o MnO e P₂O₅ também são afetados, o primeiro constante próximo a 0,002%, aumenta para 0,009 e 0,014%. O segundo, que tinha valores entre 0,029 e 0,077%, atinge 0,233 e 0,196%.

Quanto aos elementos-traço, é possível observar a configuração de praticamente um só pico ressaltado nesses horizontes. O estrôncio praticamente dobra a quantidade que vinha mantendo, antes próxima de 1.000 ppm, ela aumenta para 2.030 ppm. O bário que antes mal era detectado, apresenta 14 e 53 ppm. O enxofre e cloro não possuem padrão definido, com variações ao longo da unidade. Nesses horizontes, porém, o primeiro atinge seus maiores valores (2.620 e 4.007 ppm); o cloro mantém-se com variações entre 40 e 58 ppm.

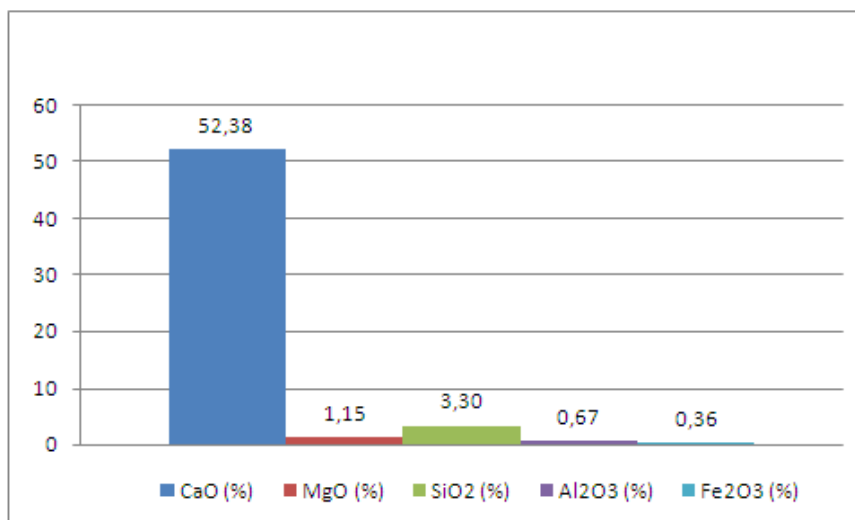


FIGURA 75 – Gráfico com as médias dos principais óxidos nas rochas do furo-guia, Unidade C.

Em direção à base da unidade, saindo do horizonte magnesiano, continua ocorrendo uma intercalação sutil entre CaO e MgO, com valores que se mantêm entre 50,08 - 54,79% e 0,52 - 1,73%. Sempre que varia o magnésio, ocorre a variação dos mesmos componentes que tiveram a variação observada no topo.

A mineralogia encontrada nesse intervalo se diversifica, com calcita, quartzo, dolomita, mica, argilominerais e provável presença de anidrita, detectada em 86,45 m de profundidade, que não se repetiu ao longo do testemunho.

5.4 UNIDADE GEOQUÍMICA D

A quarta unidade geoquímica foi colorida em amarelo e abrange o final do Intervalo 5 e início do Intervalo 6 denominados na mineração, compreendendo aproximadamente 30 m. Os componentes predominantes são o cálcio e a sílica, ocorrendo picos de magnésio e conseqüente correlação cálcica inversa, no topo da seção.

Os teores de CaO variam desde 17,81 a 54,24% e os de MgO entre 0,68 a 10,32%; essas variações são observadas na FIGURA 76. O aumento nos teores de magnésio é acompanhado pelo aumento nos teores de todos os demais óxidos, incluindo o Na₂O, que até então não havia apresentado qualquer variação.

A sílica, o alumínio e o ferro têm teores entre 6,86 - 34,89%, 1,1 - 6,48% e 0,62 - 3,37%, respectivamente. O sódio, potássio e titânio mostram variações entre

0,16 – 0,5%, 0,37 – 1,67% e 0,074 – 0,396%, respectivamente. O manganês e o fósforo variam respectivamente, entre 0,009 – 0,97% e 0,039 – 0,097%.

Quanto aos elementos-traço, o Sr varia junto ao conteúdo de CaO, nos picos em que o primeiro é maior, o elemento também aumenta. O Ba, Cl e Mn variam juntamente à intercalação observada. No S é possível observar dois picos nos quais ele aumenta, correlacionado ao aumento dos demais.

O Sr tem valores variando entre 242 e 831 ppm, sendo que os maiores valores encontram-se na porção superior da seção. O Ba possui valores com variação entre 29 e 213 ppm; o Cl varia entre 38 e 62 ppm; o Mn varia entre 23 e 387 ppm e o S entre 54 e 3.737 ppm.

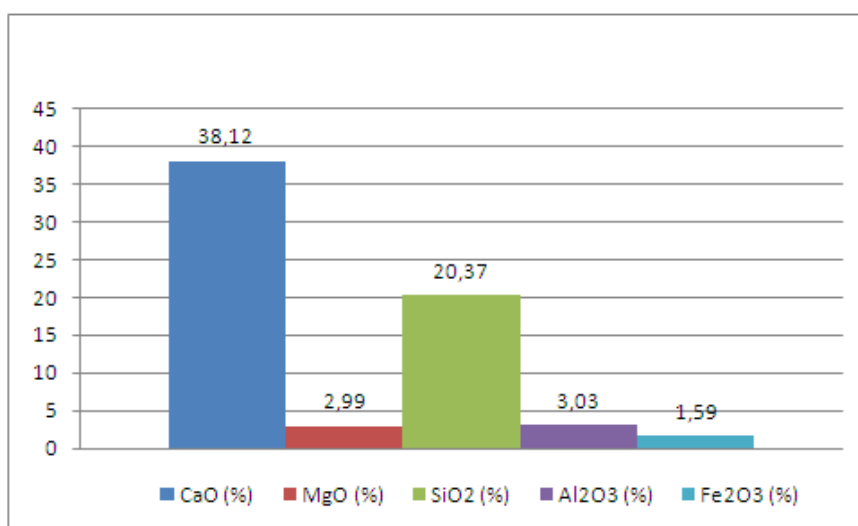


FIGURA 76 - Gráfico com as médias dos principais óxidos nas rochas do furo-guia, Unidade D.

A mineralogia nesse intervalo aumenta na quantidade de minerais siliciclásticos, com calcita, quartzo, dolomita, micas, argilominerais e ainda provável presença de halita, detectada em 96 m de profundidade, e início de ocorrência de pirita, próximo a 100 m.

5.5 UNIDADE GEOQUÍMICA E

A última unidade geoquímica foi colorida em rosa e abrange o final do Intervalo 5 e o Intervalo 6, compreendendo aproximadamente 20 m. Os componentes predominantes são o cálcio e a sílica, em uma continuação da base da

Unidade D, ocorrendo picos de magnésio e conseqüente correlação cálcica inversa, no topo da seção.

Os teores de CaO variam desde 17,81 a 54,24% e os de MgO entre 0,68 a 10,32%, seus valores médios encontram-se na FIGURA 77. O aumento nos teores de magnésio é acompanhado pelo aumento nos teores de todos os demais óxidos, incluindo o Na₂O, que até então não havia apresentado qualquer variação passível de correlação desde o início do poço.

Nessa unidade observa-se um comportamento ou assinatura geoquímica um pouco diferente da unidade silicosa anterior; as intercalações aqui são bem demarcadas em intervalos ricos em cálcio e intervalos com maiores teores de magnésio e ricos em componentes argilo-carbonosos.

A sílica, o alumínio e o ferro têm teores entre 6,36 – 63,40%, 1,16 – 17,5%, 0,69 – 5,22%, respectivamente. O sódio, potássio e titânio mostram respectivamente variações entre 0,15 – 3,2%, 0,28 – 4,4% e 0,071 – 0,9%. O manganês não foi detectado em algumas intercalações altamente argilo-carbonosas, nas demais cálcicas possui variações entre 0,03 – 0,216%. O fósforo varia entre 0,039 – 0,4%.

Quanto aos elementos-traço (Sr, Ba, S, Cl e Mn), nenhum deles se manteve constantemente “mapeável” por toda unidade, como ocorrera até então. Em algumas intercalações argilo-carbonosas (assim como ocorreu ocasionalmente com o manganês), não há conteúdo detectável desses elementos, é o caso do Sr, Cl e Mn. Nas intercalações mais cálcicas, os valores de estrôncio variam entre 137 e 439 ppm e o cloro, sem intercalações argilo-carbonosas associadas, possui valores que variam entre 36 e 80 ppm.

Os maiores valores de bário, que variam entre 26 e 895 ppm, concentram-se os em direção à base da unidade. No enxofre se observa picos máximos e ele ocorre com valores entre 96 e 5.606 ppm. Essas variações ou picos máximos são correlacionáveis com intercalações argilo-carbonosas altamente silicosas no topo da unidade.

A mineralogia nesse intervalo continua diversificada na quantidade de minerais siliciclásticos e possui calcita, quartzo, dolomita, micas, argilominerais, pirita e plagioclásio. As micas são constantes por toda unidade e os argilominerais aparecem até aproximadamente 140 m de profundidade. A pirita é detectada no topo da unidade e o plagioclásio na base.

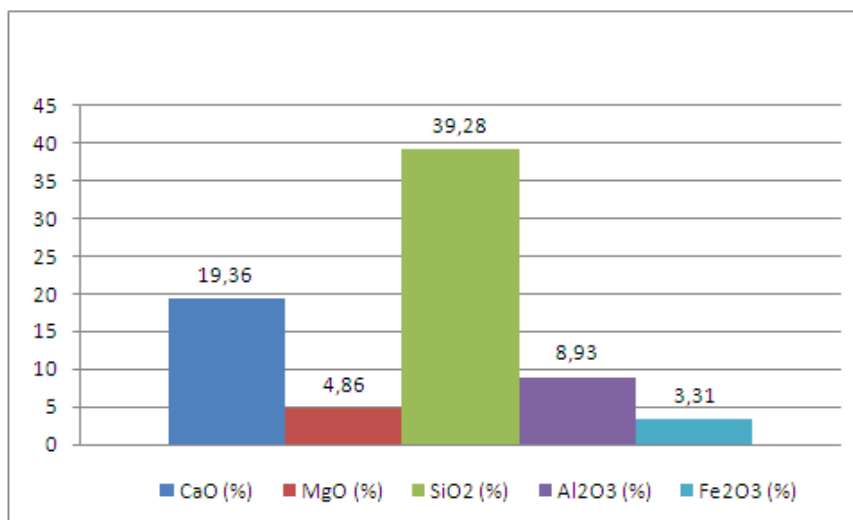


FIGURA 77 – Gráfico com as médias dos principais óxidos nas rochas do furo-guia, Unidade E.

5.6 ANÁLISES ISOTÓPICAS DE CARBONO E OXIGÊNIO

Variações no $\delta^{13}\text{C}$ refletem mudanças na razão entre o carbono orgânico e o carbono inorgânico que é removido dos oceanos através do soterramento de matéria orgânica e da deposição de carbonato sedimentar. Excursões positivas nos sedimentos oceânicos refletem um aumento no soterramento do carbono orgânico em relação ao carbono inorgânico, enquanto excursões negativas de $\delta^{13}\text{C}$ indicam o oposto. Para carbonatos marinhos inalterados, os valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ são de aproximadamente 0‰. Em carbonatos Neoproterozóicos, o registro isotópico é caracterizado por ocorrências de importantes excursões, negativas e positivas (Vieira, 2007).

Na FIGURA 78 podem ser observadas as razões elementares de Ca/Mg e as variações de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$, nas amostras ao longo do furo-guia. As variações encontradas estão descritas nas distintas unidades geoquímicas, a partir da página 98.

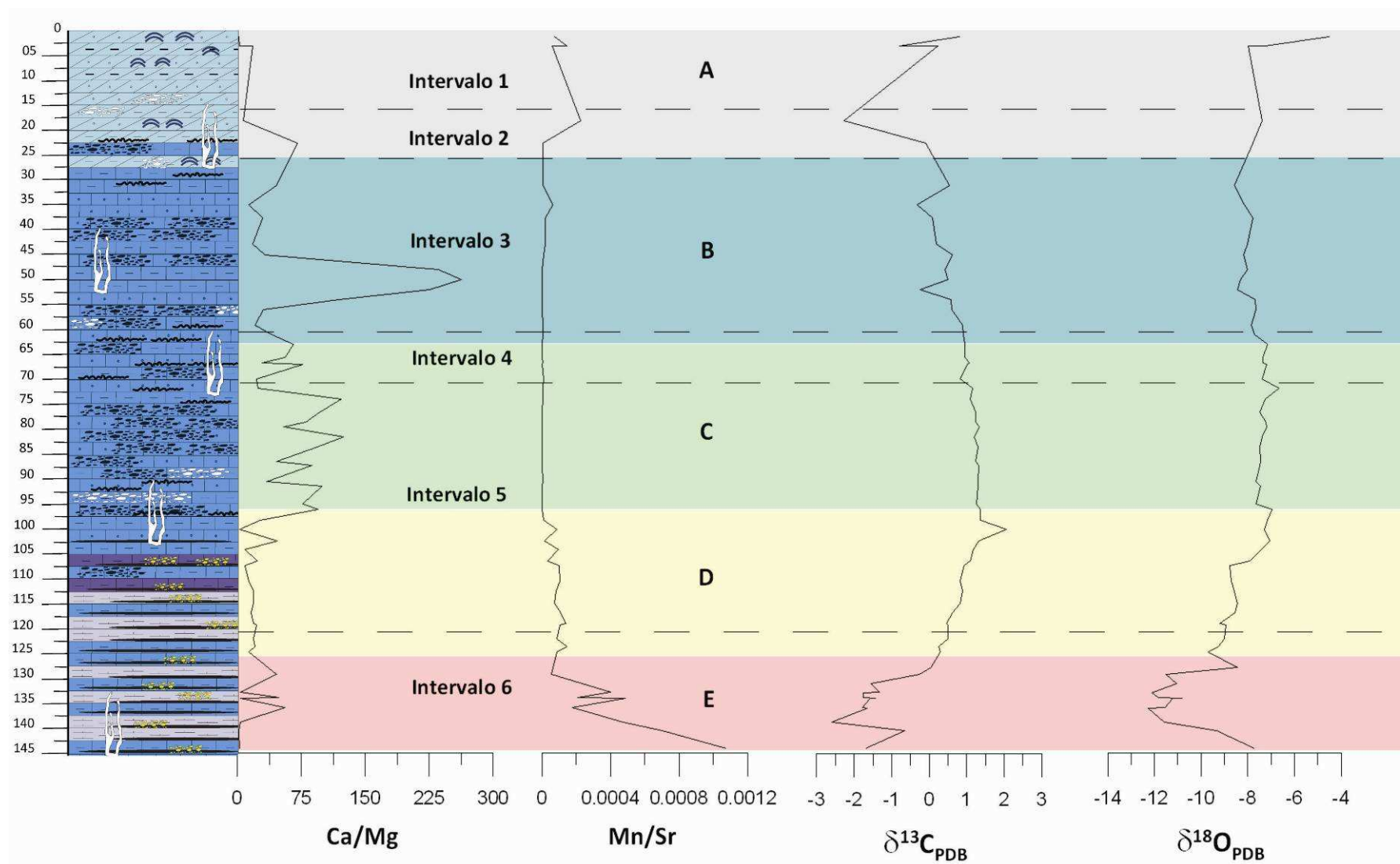


FIGURA 78 – Perfis com as unidades geoquímicas para as rochas do furo-guia (CSNMA-07-006), com dados de razões elementares e isotópicas.

Ao longo da Unidade Geoquímica A, os valores isotópicos mostraram variações para o $\delta^{13}\text{C}$ e para o $\delta^{18}\text{O}$, como pode se observar na FIGURA 79 e na FIGURA 80, sendo que as amostras dos testemunhos 0016 e 0019 são as que possuem menor variação, com tendências semelhantes.

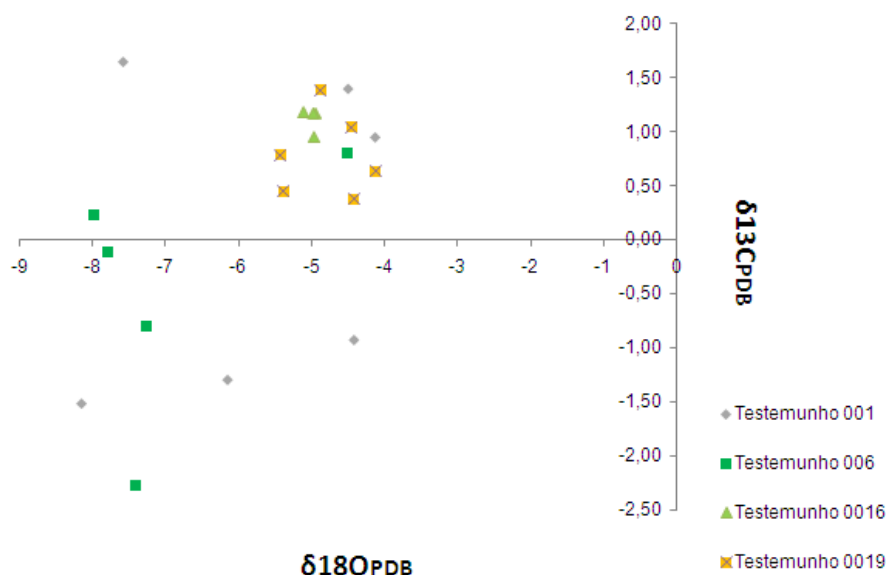
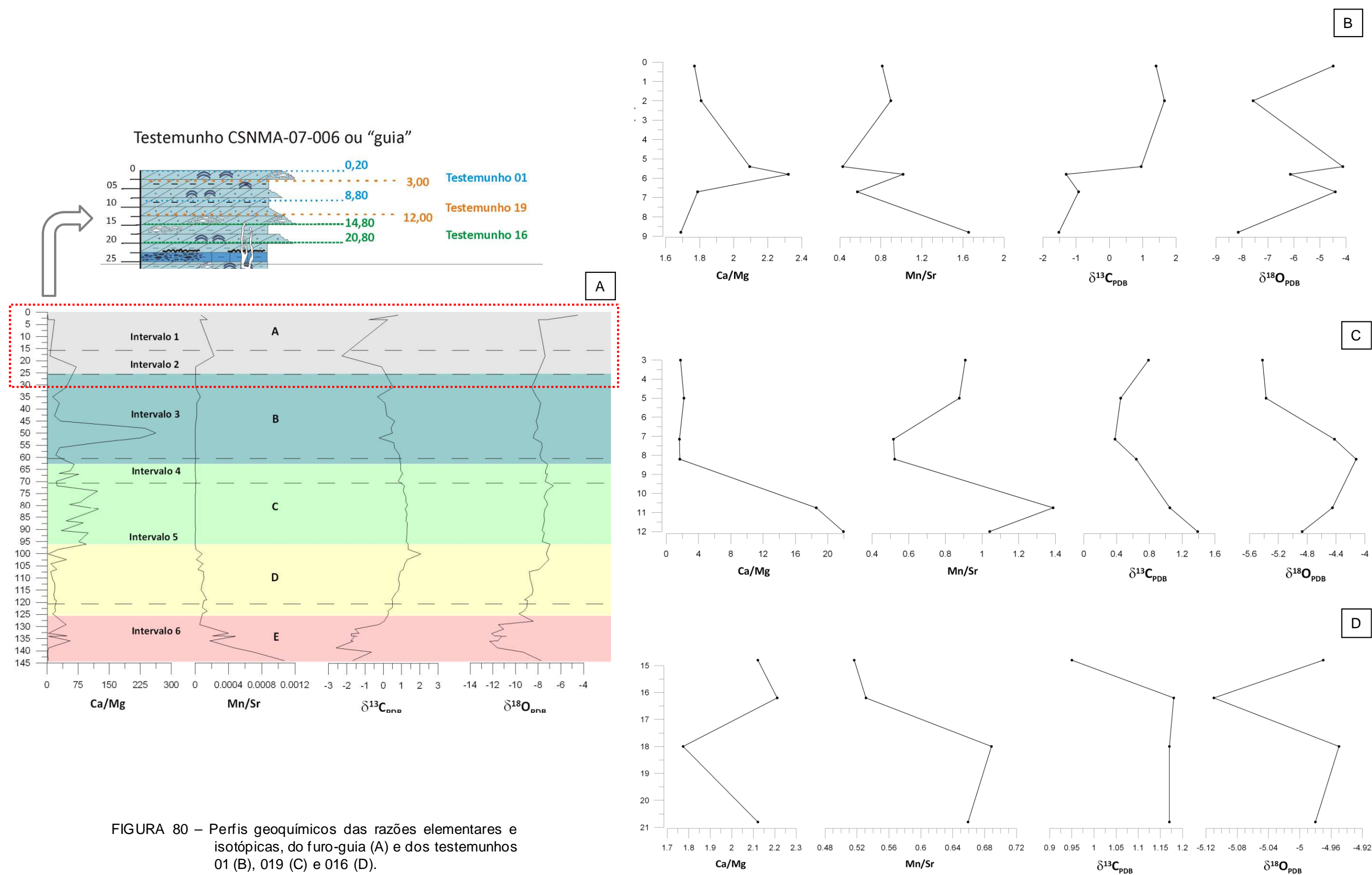


FIGURA 79 – Gráfico da variação dos valores isotópicos ao longo da Unidade A.

Nessa unidade ocorrem duas incursões negativas principais ($-0,8\text{‰}$ e $-2,27\text{‰}$), e duas incursões positivas de $\delta^{13}\text{C}$, podendo correlacionar na base da unidade, dentro do Intervalo 2, o horizonte magnesiano com a incursão negativa de $-2,27\text{‰}$ e o conteúdo de Sr, que aumenta juntamente com o conteúdo de cálcio. São também correlacionáveis a essa incursão negativa, a diminuição da razão Ca/Mg, que ocorre juntamente com o aumento da razão Mn/Sr.

No furo-guia, o $\delta^{18}\text{O}$ não se mostra correlacionável com o $\delta^{13}\text{C}$, mantendo-se praticamente constante durante a sequência, com valores de $-7,77\text{‰}$ e $-7,97\text{‰}$. Sua maior variação ocorre no extremo topo, onde ele salta de $-4,5\text{‰}$ para $-7,25\text{‰}$ e juntamente com o aumento da razão Mn/Sr, quando seu valor é $-7,39\text{‰}$.

Os testemunhos 001e 006 são os que mostram maiores variações nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$. Para o oxigênio, no primeiro testemunho, as variações ocorrem entre $-8,14\text{‰}$ e $-4,12\text{‰}$; no segundo, os valores variam de $-4,5\text{‰}$ a $-7,97\text{‰}$. Nos testemunhos 0016 e 0019, os valores observados de $\delta^{18}\text{O}$ estão, para o primeiro, em torno de -5‰ e, para o segundo testemunho, com valores entre $-4,12\text{‰}$ e $-5,42\text{‰}$.



Quanto ao carbono, no testemunho 001, os valores vão de -1,52‰ a +1,65‰. No testemunho 006, ocorrem variações entre -2,27‰ e +0,81‰. Os testemunhos 0016 e 0019 mostram uma dispersão menor em torno de +1,17‰ (primeiro) e +0,45‰ a +1,39‰ (segundo).

Na Unidade Geoquímica B, o $\delta^{13}\text{C}$ apresenta duas incursões negativas próximas aos horizontes magnesianos, de -0,33‰ e -0,23‰, as variações podem ser observadas na FIGURA 81. Os demais valores situam-se entre +0,09‰ e +0,63‰. Em direção à base tornam-se gradacionalmente mais positivos, atingindo +0,91‰.

O $\delta^{18}\text{O}$ demonstra correlação com o $\delta^{13}\text{C}$ pois pelo perfil, de maneira geral, parece acompanhar as incursões do $\delta^{13}\text{C}$, com pequenas variações localizadas. Seus valores situam-se entre -8,00‰ a -8,58‰, mas na profundidade de 37,5 m quando ocorre o valor mais próximo de 0 para o $\delta^{13}\text{C}$ (+0,9‰), o $\delta^{18}\text{O}$ aumenta (-7,77‰) e em direção à base, quando os valores de $\delta^{13}\text{C}$ tornam-se gradualmente mais positivos, o $\delta^{18}\text{O}$ também aumenta (-7,64‰ a -7,85‰).

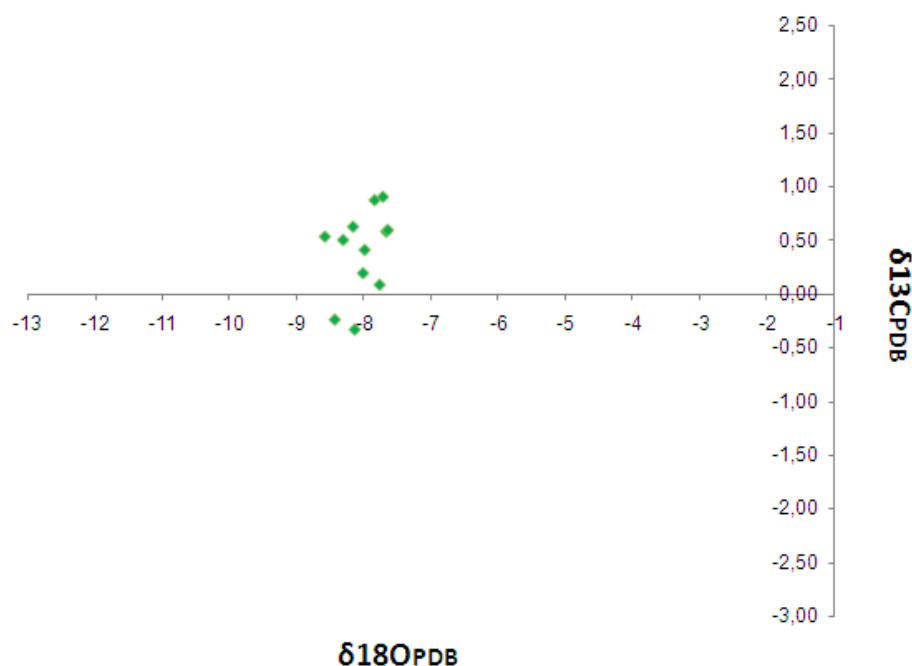


FIGURA 81 – Gráfico da variação isotópica ao longo da Unidade B, nas rochas do furo-guia.

Na Unidade Geoquímica C, os valores isotópicos mostram-se praticamente constantes, sem saltos ou incursões anômalas (FIGURA 82). É possível observar, principalmente a partir dessa unidade, a configuração de uma “barriga” nos valores

de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$, mostrando que eles variam juntos. No horizonte magnesiano, no topo, ocorrem as maiores variações de ambos, sendo que o $\delta^{18}\text{O}$ aumenta levemente em direção à base. A razão Ca/Mg é marcada por intercalações nessa unidade, nas quais o valor mínimo é 22,13 e o máximo, 124,87.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ no topo encontram-se entre 0,82 e 0,96‰ e chegam a 1,07‰, posteriormente, retomam o padrão de valores crescentes, mantendo-se entre 1,16 e 1,35‰. O $\delta^{18}\text{O}$ continua aumentando conforme o aumento do $\delta^{13}\text{C}$; no topo da unidade mantêm-se entre -7,16 e -7,39‰ e então aumenta para -6,65‰. Posteriormente, seus valores diminuem e gradacionalmente situam-se entre -7,20 e -7,66‰.

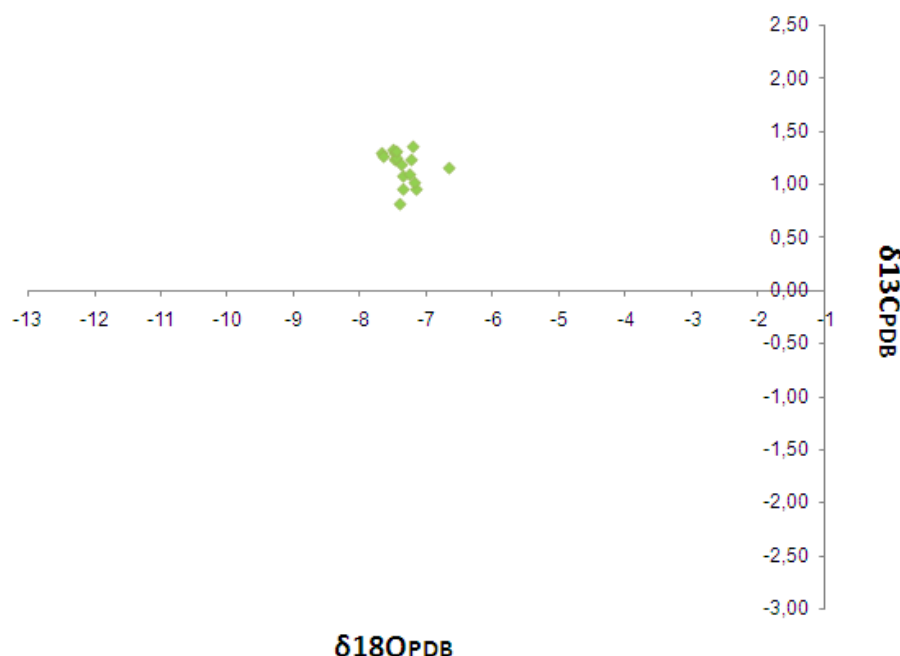


FIGURA 82 – Gráfico da variação isotópica ao longo da Unidade C, nas rochas do furo-guia.

Na Unidade Geoquímica D, a tendência que vinha sendo observada de incursão positiva passa gradualmente para incursões negativas (FIGURA 83). Observa-se um pico no topo da unidade de $\delta^{13}\text{C}$ com valor de +2,05‰ em meio aos valores constantes entre +1,10 e +1,37‰. Do meio para a base da sequência, há diminuição gradual de valores próximos a +0,93‰ para valores próximos a +0,26‰.

O $\delta^{18}\text{O}$ acompanha as variações do $\delta^{13}\text{C}$, mantendo-se, do topo até a metade da unidade, com valores entre -6,96 e -7,91‰. Da metade para a base da unidade o $\delta^{18}\text{O}$ adquire valores entre -8,44 e -9,68‰.

A razão de Ca/Mg varia bastante no topo da unidade (com valores entre 2,04 e 94,53) e diminui significativamente em direção à base, onde apresenta valores mais constantes entre 12,93 e 21,94. A razão Mn/Sr tem seus picos correlacionados ao aumento das intercalações siliciclásticas.

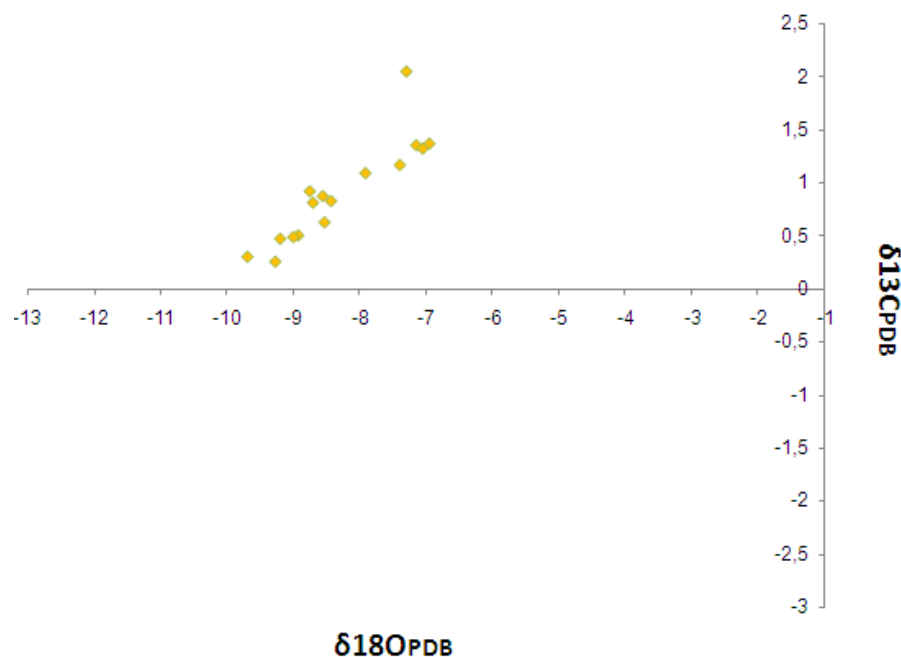
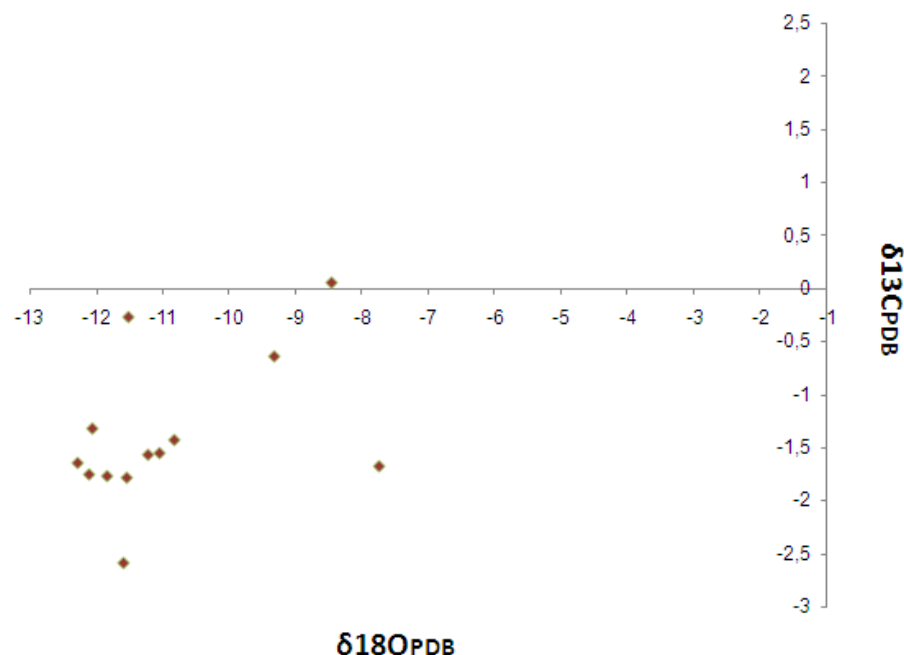


FIGURA 83 – Gráfico da variação isotópica ao longo da Unidade D, nas rochas do furo-guia.

Na Unidade Geoquímica E, as análises isotópicas nesse intervalo mostram picos de incursões negativas para o $\delta^{13}C$ e $\delta^{18}O$ (FIGURA 84). Os intervalos próximos a 0‰ que o $\delta^{13}C$ vinha demonstrando ao final da Unidade D, diminuem gradativamente, mas com variações localizadas. No topo da unidade, os “picos” são marcados por valores entre -1,32‰ e -1,78‰.

Ocorre então um leve aumento para -1,65‰ em 136 m, seguido por uma diminuição para -2,59‰. Novamente, um aumento ocorre para -0,64‰ e, na base da unidade, uma diminuição (-1,67‰). Essas ligeiras diminuições ou incursões negativas ocorrem junto às intercalações argilo-carbonosas.

O $\delta^{18}O$ fica ligeiramente mais negativo, acompanhando as variações do $\delta^{13}C$. Da metade da unidade para o topo, os valores variam entre -10,83‰ e -12,27‰, na base, quando volta a ocorrer aumento no $\delta^{13}C$, o $\delta^{18}O$ aumenta seus valores em -9,33‰ e -7,74‰. A razão Ca/Mg varia entre 1,96 e 55,40 e só pode ser obtida em níveis mais cálcicos.



negativas tanto para o carbono (aproximadamente -2,5‰) quanto para o oxigênio (até aproximadamente -13‰), isso ocorre provavelmente devido à composição diferenciada das unidades superiores, com aporte pelítico e conteúdo de matéria orgânica. Cabe ressaltar, todavia, que além dessas características, esses valores negativos são regionalmente descritos (em rochas dolomíticas sem ocorrências de pelitos ou matéria orgânica).

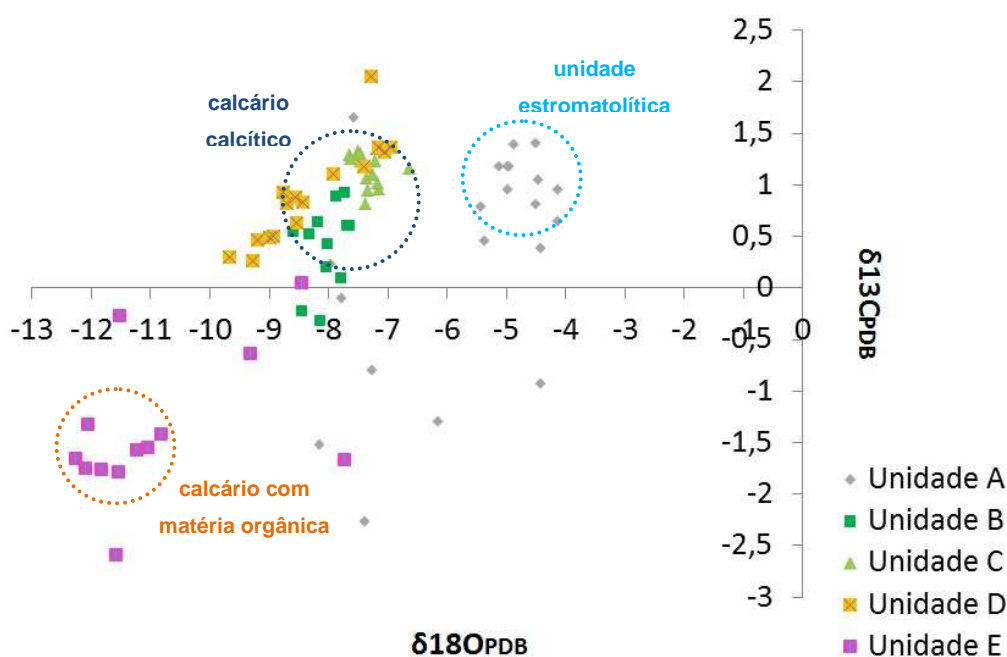


FIGURA 85 – Gráfico com as tendências de variação isotópica, encontradas ao longo do furo-guia e seu significado litológico.

5.6.1 Análise dos Carbonatos Diagenéticos e de Cimentação

Foram feitas análises isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ de alguns doloespatos interpretados como dolomita diagenética, descritos ao longo das sucessões carbonáticas, com o objetivo de comparação dos valores obtidos nesses, com os valores obtidos em dolomita (rocha-total) ao longo da Unidade Geoquímica A (uma unidade essencialmente dolomítica). Isso é interessante porque frequentemente, esses carbonatos “mascaram” a rocha original e não são estudados em detalhe.

Doloespatos são encontrados em meio ao calcário dolomítico e calcítico, até aproximadamente 100 m de profundidade (FIGURA 86A e 86B). Algumas ocorrências são locais e outras, de maior distribuição. Martins (1999) descreve que, nas seções feitas na Formação Sete Lagoas, as fácies de rampa interna,

intermediária e externa do topo da sequência carbonática basal encontram-se parcial ou totalmente dolomitizadas, em toda a sua extensão.

Os mesmos tipos de dolomitos petrograficamente encontrados por Martins (1999), foram descritos na Mineração Bocaina, ao longo dos subcapítulos de faciologia: “(...) micro a criptocristalino e mesocristalino, sendo os primeiros, mais freqüentes. Nesses casos, a textura original da rocha permanece preservada como um fantasma (...). Cristais mesocristalinos ocorrem preenchendo espaços porosos (...) e têm um aspecto mais limpo.”

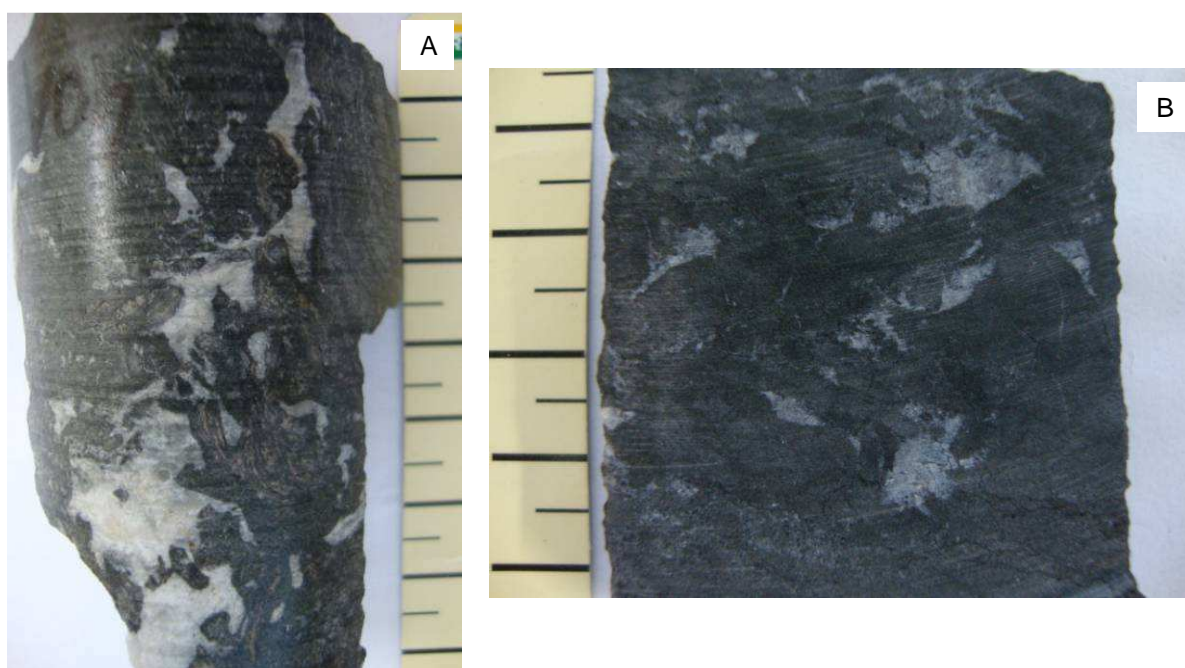


FIGURA 86 – (A) Doloespato em meio às construções colunares estromatolíticas, no *wackestone* estromatolítico; (B) doloespato em meio ao *wackestone* calcítico. Em ambas as imagens a escala é centimétrica.

As análises isotópicas de dolomitas diagenéticas deram resultados com certa tendência (TABELA 5 e gráfico da FIGURA 87) a valores negativos, diferentes das análises de dolomita obtidas na rocha-total. As dolomitas diagenéticas, comparadas às dolomitas primárias, apresentam depleção em $\delta^{18}\text{O}$ e mantêm os valores constantes para $\delta^{13}\text{C}$ em torno de 0 a -2‰, valores ligeiramente mais negativos se comparadas às dolomitas da Unidade A, com valores preferencialmente entre 0‰ e +2‰. Um único valor pode ser considerado anômalo entre os doloespato analisados, que deu um salto no $\delta^{13}\text{C}$ para +8,59‰.

TABELA 5 – VALORES ISOTÓPICOS DAS DOLOMITAS DIAGENÉTICAS

Nº LAMIR (611/10)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰VPDB)
8 B	-1,05	-12,19
9 B	-1,22	-10,54
25 B	-1,28	-9,40
36 B	-2,11	-7,55
93	-1,19	-11,26
95	8,57	-7,82
94	-0,70	-3,08
97	0,69	-10,42

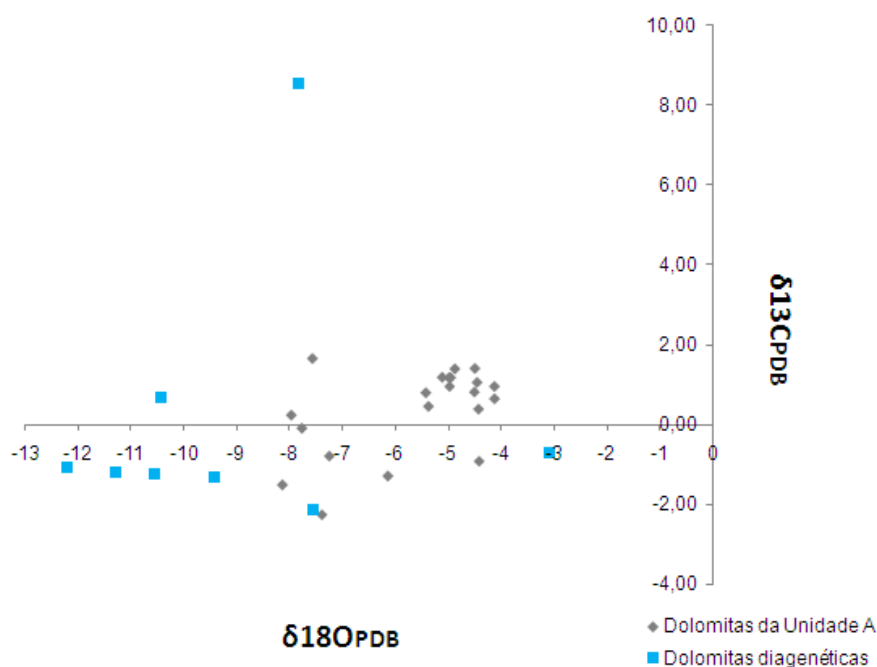


FIGURA 87 – Gráfico da variação encontrada entre os valores isotópicos obtidos nos doloespátos, em azul, e na dolomita (rocha total) da Unidade A.

Além dos carbonatos diagenéticos, há ainda a ocorrência de uma brecha clasto-suportada, cimentada por calcita branca (fácies brecha calcítica, no Intervalo 4), com continuação em profundidade, verificada na mineração, e descrição semelhante na região (FIGURAS 88A e 88B). Análises isotópicas nessas calcitas visam comparar a calcita cimentante de uma provável brecha de colapso, de calcitas largamente encontradas em fraturas, ao longo da seção (FIGURAS 88C e 88D).

Kuchembecker (2011), na sua Unidade 10, descreve a brecha calcítica com as mesmas características descritas na Mineração Bocaina: “(...) clasto-suportada,

com seixos e matacões (...) dificilmente individualizáveis, cimentados por calcita espática branca.” O autor sugere se tratar de uma brecha de colapso, associada à dissolução pré a sin-diagenética. É interessante notar que a brecha descrita pelo autor, na referida Unidade 10 (base do intervalo estromatolítico), provavelmente correlata à da Mineração Bocaina, ocorre a uma distância em profundidade de aproximadamente 50 m acima da observada na mineração.

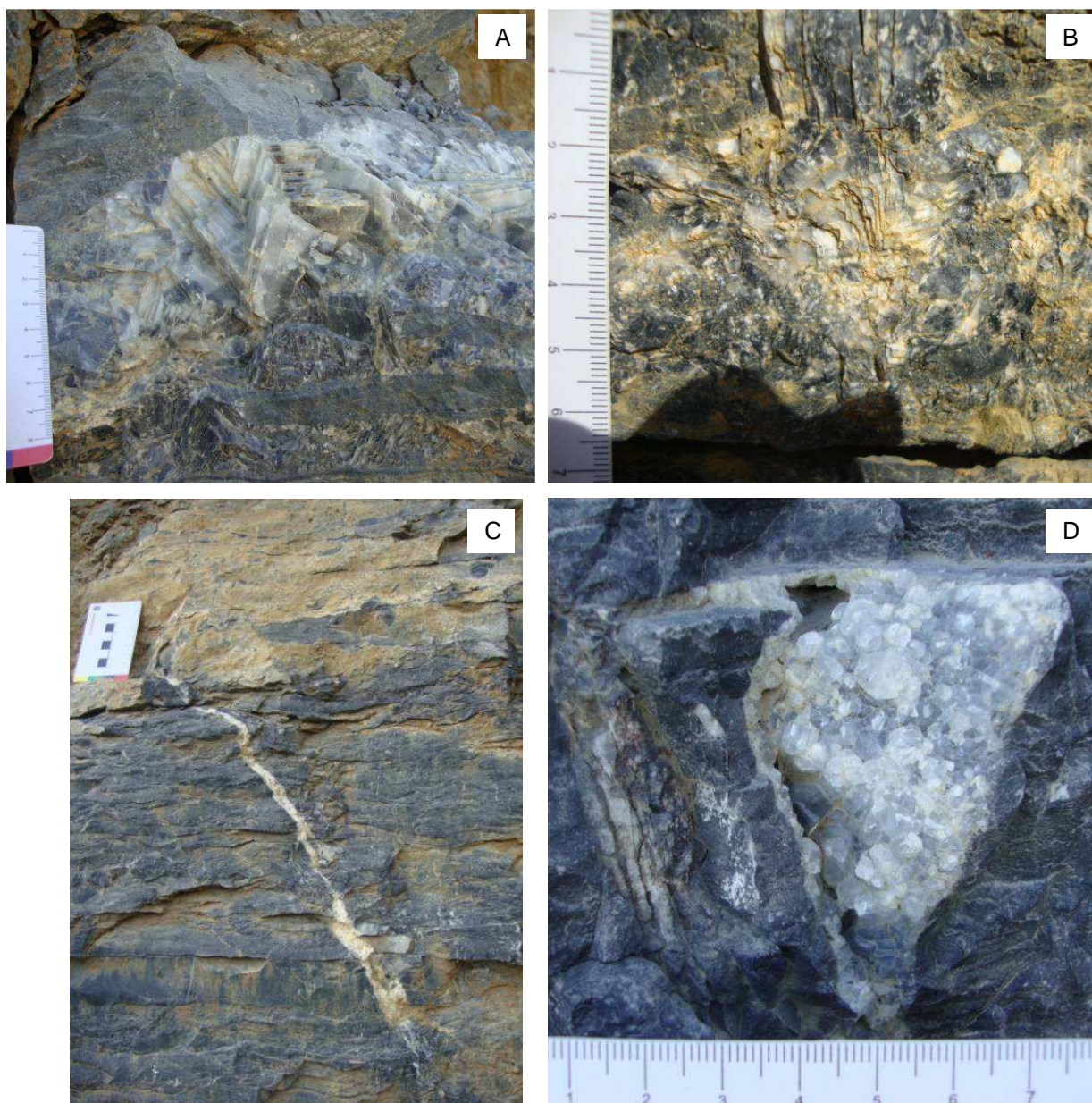


FIGURA 88 – (A) Ocorrência da brecha calcítica no *mudstone* magnésiano; (B) ocorrência da brecha calcítica no *wackestone* calcítico, aproximadamente 30 m abaixo do *mudstone* magnésiano; (C) fratura preenchida com calcita leitosa no *wackestone* calcítico; (D) preenchimento de cavidade em fratura por calcita, no *mudstone* magnésiano. Em todas as imagens a escala é centimétrica.

As análises isotópicas das calcitas não apresentaram tendências, havendo uma significativa variação nas razões obtidas, tanto para $\delta^{13}\text{C}$ quanto para $\delta^{18}\text{O}$ (TABELA 6 e gráfico da FIGURA 89). Dessa forma, a comparação entre a calcita cimentante da brecha e as calcitas preenchendo fraturas não mostrou correlações.

TABELA 6 – VALORES ISOTÓPICOS DAS CALCITAS DE CIMENTAÇÃO (IDENTIFICADAS COM ASTERISCO) E DE PREENCHIMENTO DE FRATURAS

Nº LAMIR (611/10)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰VPDB)
* 42 B	2,79	-9,73
* 99	4,93	-12,16
* 100	-0,55	-6,71
57 B	1,34	-8,17
70 B	0,87	-7,98
79 B	-0,75	-10,66
82 A	-2,08	-11,53
88 B	-3,20	-11,90
92	2,63	-8,09
96	0,77	-4,94
98	1,78	-7,47

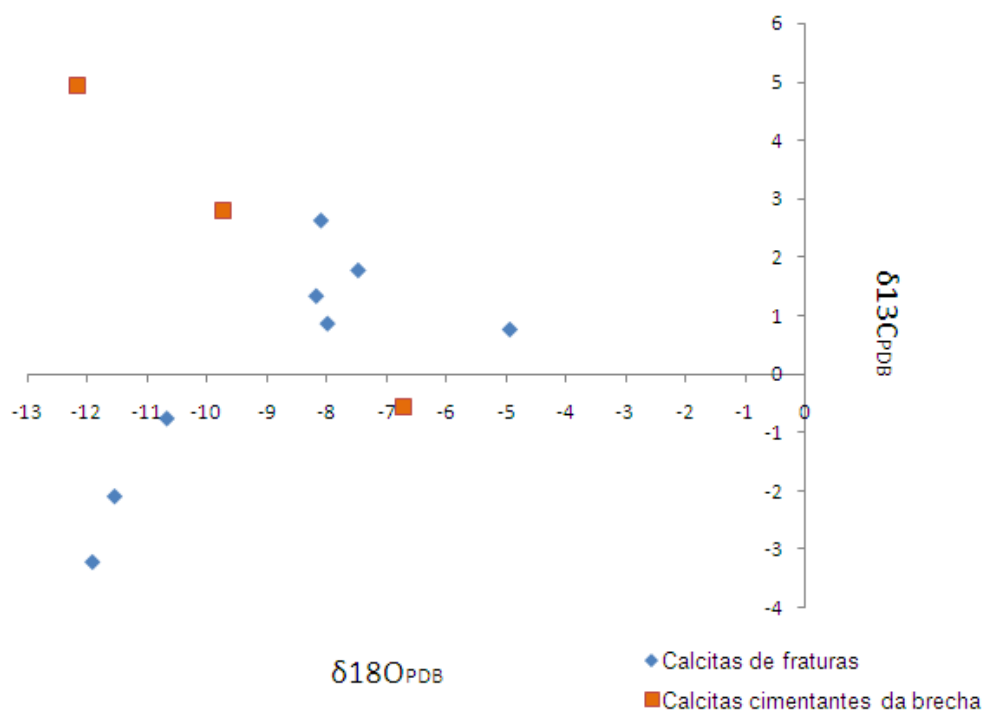


FIGURA 89 – Gráfico com a dispersão encontrada nos valores isotópicos das calcitas de fraturas e das calcitas de cimentação da brecha.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 CORRELAÇÕES REGIONAIS E MODELO DEPOSICIONAL

Nessa pesquisa procurou-se detalhar as divisões utilizadas na prática da mineração, denominadas “intervalos” e detalhá-los quanto à sua faciologia. Em seis intervalos, foram descritas onze fácies distintas. Essa faciologia foi comparada com trabalhos feitos com abordagem mais regional, de localidades próximas à Mineração Bocaina (FIGURA 90 e FIGURA 91). Os resultados obtidos, principalmente isotópicos, foram comparados com os dados obtidos nas seções regionais descritas por Vieira (2007), na FIGURA 90; Kuchembecker (2011), na FIGURA 91, e Martins (1999).

A fácies basal, no Intervalo 6, assemelha-se à fácies descrita por Vieira (2007) como constituinte da Associação de Fácies 1, do autor. O autor descreve um conglomerado polimítico cimentado por carbonatos, com seixos arredondados a angulares. Na concepção desse autor essa associação corresponde ao Conglomerado Carrancas, em canais isolados incisos no embasamento paleoproterozóico.

Não existem evidências claras de influência glacial nesses depósitos (*op. cit.*). As unidades glaciogênicas, segundo esse autor, como a Formação Jequitai e sucessões inferiores do Grupo Macaúbas, não podem ser admitidas na localidade de estudo.

Kuchembecker (2011) descreve como primeira unidade assentada sobre o embasamento uma camada de diamictito com aproximadamente 50 cm, de espessura e composição semelhantes ao descrito na Mineração Bocaina. Descreve como Unidade 2 um calcário impuro, de características semelhantes à descrita na fácies basal da mineração, porém, segundo descrição do autor, o calcário impuro ocorre estratigraficamente acima do diamictito; na Mineração Bocaina o calcário impuro ocorre estratigraficamente abaixo do diamictito.

Uma explicação possível para esse “desencontro” (o fato de o diamictito ser encontrado nas seções próximas, em posições estratigráficas diferentes) pode ser a de que essa configuração pode não se tratar de relações estratigráficas e sim,

representar somente ordenação dos clastos de diamictito, e não da camada de diamictito em si.

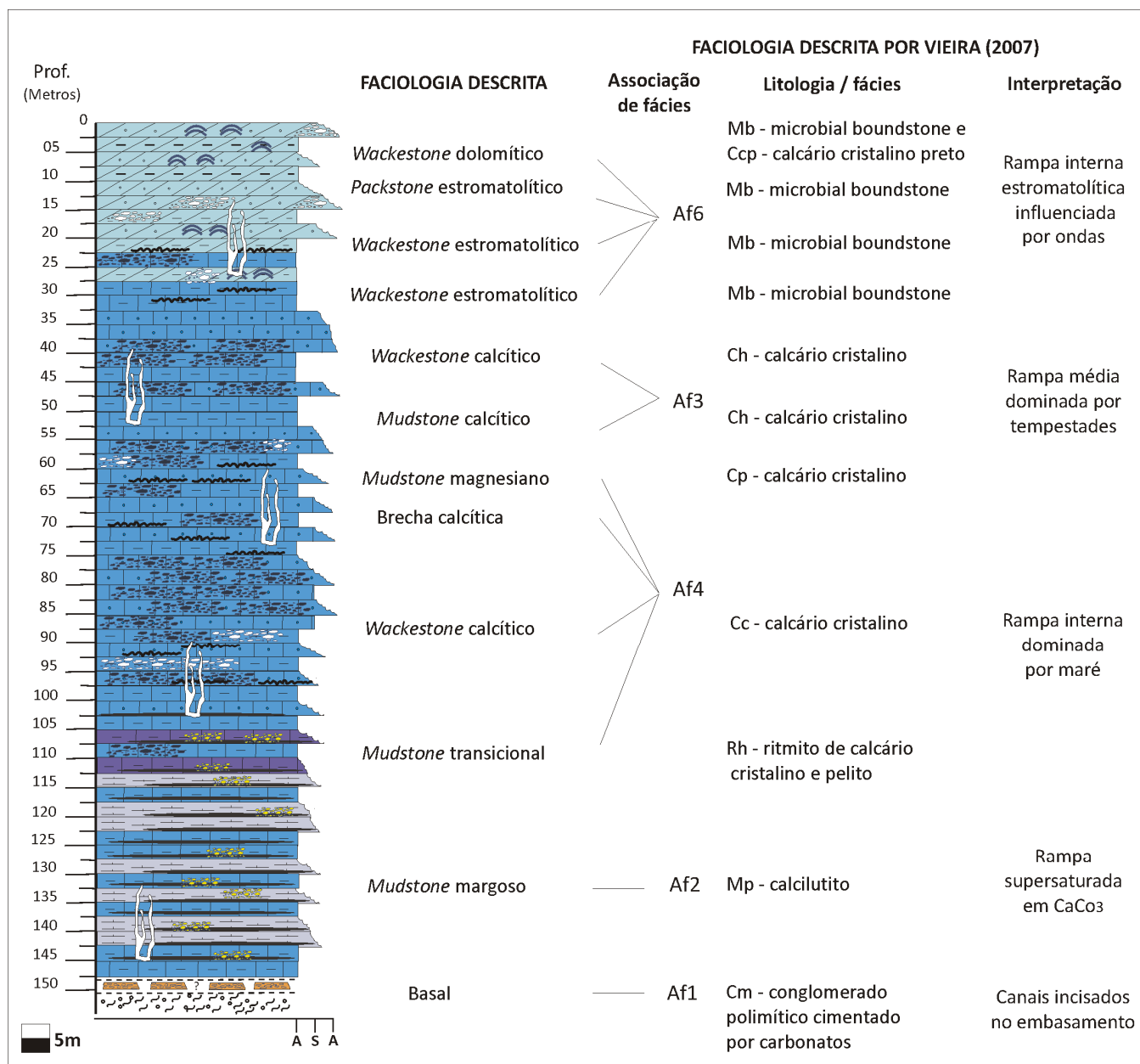


FIGURA 90 – Faciologia descrita na Bocaina e correspondência com as associações de fácies sumarizadas de Vieira (2007).

A fácies *mudstone* margosa é equivalente à fácies “Mp” – calcilutito, descrita por Vieira (2007). Essa constitui-se de precipitação de calcilutito associada a águas supersaturadas em CaCO₃, em ambiente calmo. Essa fácies adicionalmente à “Mc” – calcilutito *cemenstone*, formada no mesmo contexto, formam a Associação de Fácies 2, do autor. Para a fácies Mc, porém, são descritos leques de cristais de calcita, interpretados como pseudomorfos de aragonita.

Kuchembecker (2011) descreve na sua Unidade 3, equivalente à fácies *mudstone* margosa, lâminas milimétricas a bandas decimétricas de uma rocha escura, argilosa, não reativa ao HCl, com contato brusco a gradacional com as porções carbonáticas; exibem fissilidade, assemelhando-se a folhelhos, e possuem sulfetos concentrados ou disseminados segundo o acamamento. O autor também descreve dentro dessa unidade, sucessivas lâminas formadas por pseudomorfos de aragonita, com cristais arrançados na forma de leques.

Essa fácies com aragonita, de ocorrência aparentemente regional, inclusive com descrições de calcário rosa e avermelhado associados, não foi observada na Mineração Bocaina. Uma observação pertinente é o fato de que a seção descrita por Kuchembecker (2011) foi de aproximadamente 180 m, e as unidades basais descritas pelo mesmo possuem espessuras maiores em comparação com a Mineração Bocaina, na qual a seção inteira, do embasamento ao topo, é de aproximadamente 150 m, a comparação entre as seções pode ser observada na FIGURA 5.2.

No Intervalo 5, a fácies *mudstone* transicional tem características semelhantes com a fácies “Rh” – ritmito de calcário cristalino e pelito, de Vieira (2007). Essas rochas mostram acamamento heterolítico, com estruturas *wavy-flaser*, recobrimento de argila e algumas marcas onduladas assimétricas. Essas camadas, segundo o autor, indicam alternância entre tração e suspensão controlada por correntes de maré.

Vieira (2007) contempla que o arranjo regular das camadas é interpretado como produto da alternância das águas calmas e correntes, relacionadas com os ciclos de maré cheia e maré vazante; os níveis de pelito seriam correspondentes aos ciclos de maré mais alta. Esses depósitos seriam interpretados como o registro da deposição de intermaré em rampa interna.

Kuchembecker (2011) descreve na sua Unidade 4, um pacote de marga e argilito, na base a marga tem coloração verde-clara cujo conteúdo carbonático diminui progressivamente. Descreve constantes intercalações de calcários muito finos maciços, brancos, cinza claros e rosas (os últimos, sem correspondência na Mineração Bocaina).

Ainda no Intervalo 5, a fácies *wackestone* calcítica encontra correspondência com a fácies “Cc” – calcário cristalino, da Associação de Fácies 4 de Vieira (2007). Essa fácies possui laminação cruzada cavalgante supercrítica e laminação quase

planar, registrando fluxos oscilatórios e combinados depositando por tração e suspensão.

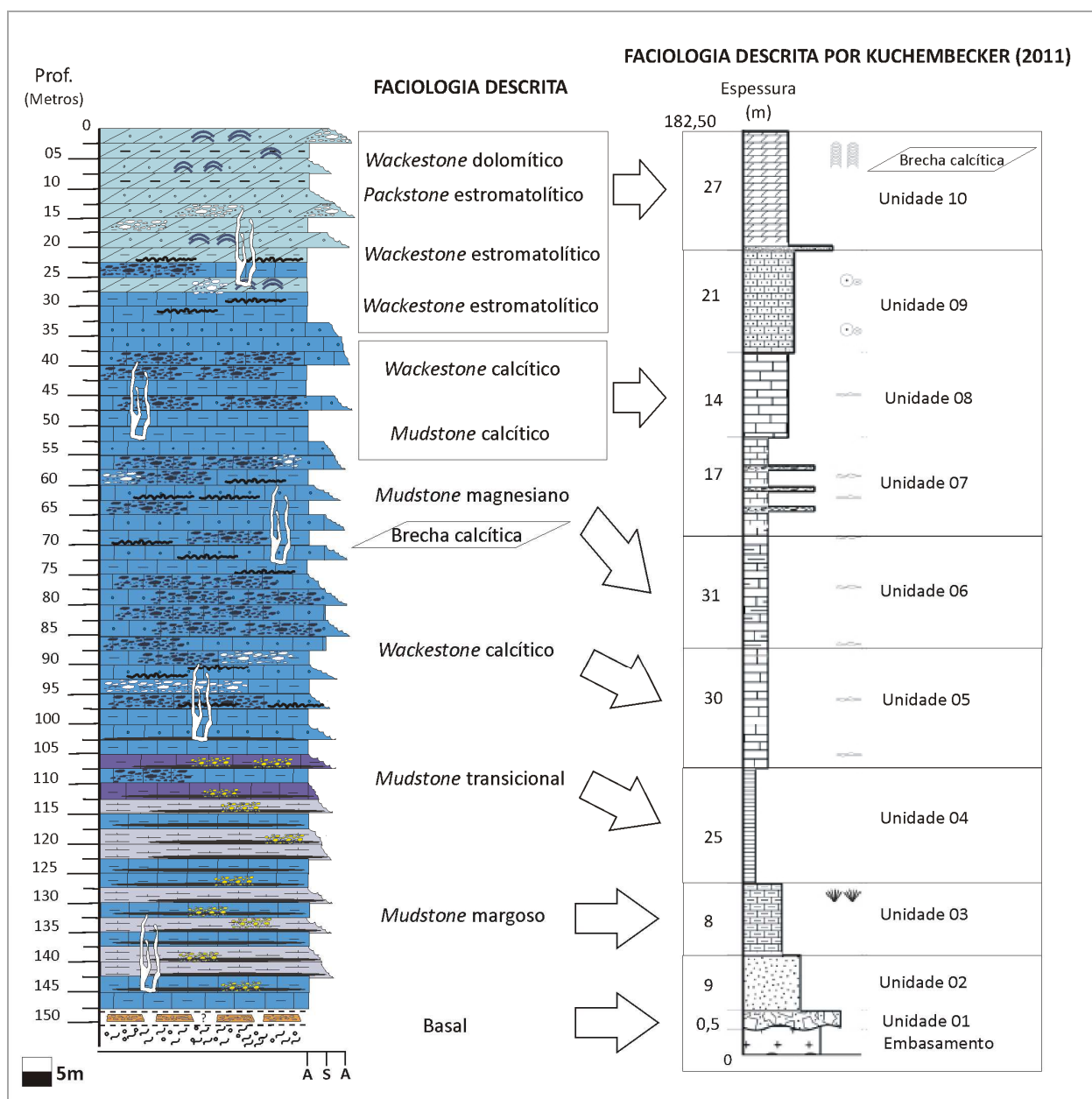


FIGURA 91 – Correlação faciológica esquemática, entre a seção caracterizada na Mineração Bocaina, em cores, e a seção caracterizada por Kuchembecker (2011), em preto-e-branco.

Kuchembecker (2011) descreve na sua Unidade 5, um intervalo heterogêneo com predomínio de calcarenito fino a médio, com camadas milimétricas a centimétricas mais escuras e mais finas, dando à rocha aspecto bandado. é constante a presença de estilólitos bem desenvolvidos que concentram material argiloso / carbonoso e *dissolution seams*.

No Intervalo 4, a fácies *mudstone* magnesiana é semelhante à fácies “Cp” – calcários cristalinos com estratificação plano-paralela, da Associação de Fácies 4 descrita por Vieira (2007), essas rochas exibem laminação plano-paralela, marcas de calha, marcas onduladas assimétricas, laminações truncadas de baixo ângulo e geometria de canal. A autora propõe os processos de migração de barra preenchendo canais de submaré.

Kuchembecker (2011) também encontrou rochas semelhantes, as quais ele organizou na Unidade 6; é marcante a alternância entre camadas decimétricas de calcarenito maciço a laminado e camadas de calcários fortemente afetados por estruturas de dissolução. Descreve ainda que ocorrem cavidades fenestrais irregulares, sempre preenchidas por calcita espática, além de raros oólitos substituídos por sílica criptocristalina, características descritas na Mineração Bocaina.

Para a fácies brecha calcítica no Intervalo 4 somente foi encontrada correspondência com a descrição feita por Kuchembecker (2011), nas rochas dolomíticas de topo da Unidade 10: “camada métrica de brecha dolomítica clasto-suportada, com seixos a matacões (...), dificilmente individualizáveis, cimentados por calcita espática branca.”

Para as unidades de topo, houve correlação com as descrições feitas por Vieira (2007) das fácies que compõem a Associação de Fácies 3 do autor. No Intervalo 3 da Mineração Bocaina, as fácies *mudstone* calcítica e *wackestone* calcítica correspondem à fáceis “Ch” – calcário cristalino, do autor. Essa fácies apresenta estratificação cruzada *swalley* e *hummocky*, e a deposição teria se dado por fluxo combinado com predominância de fluxo oscilatório relacionada à ação de onda de tempestade em zona de *shoreface*.

Kuchembecker (2011) descreve nas Unidades 7 e 8 rochas semelhantes, na primeira ele denomina respectivamente, as brechas intraformacionais características desse intervalo como camadas intraclásticas centimétricas a decimétricas, com diversas porções de calcarenito médio a grosso, normalmente orientados segundo o acamamento. Para a Unidade 8, descreve que os filmes argilosos associados à compactação na Unidade 7, desaparecem, há ainda constantes variações granulométricas conferindo à rocha aspecto bandado, e os níveis de calcário mais fino são delimitados por estilólitos, com pouco material argiloso. Essas

características corroboram a semelhança entre as fácies descritas pelo autor com as observadas na mineração.

As fácies do final do Intervalo 3, Intervalo 2 e Intervalo 1 são fácies estromatolíticas passíveis de correlação regional. Além dos trabalhos citados aqui, há outros, que denotam ocorrências desse horizonte estromatolítico, confirmando que o mesmo possui extensão regional.

As fácies *wackestone* e *packstone*, ambas estromatolíticas, que se intercalam em direção ao topo da seção, correspondem à fácies “Mb” – *microbial* boundstone ou biolitito, da Associação de Fácies 6 de Vieira (2007). No Intervalo 1 ocorre também correspondência com a fácies “Ccp” – calcário cristalino preto com estruturas de ondas, descrito pelo autor. A fácies Mb foi observada em apenas uma das seções estudadas pelo autor mas o mesmo admite que ela é expressiva e corresponde a estromatólitos colunares cinza escuros pretos, raramente ramificados.

As variações encontradas na mineração de dolomitização em meio às estruturas estromatolíticas, são descritas pelo autor (*op. cit.*) como espaços intercolunares que foram preenchidos localmente por brechas carbonáticas.

Kuchembecker (2011) descreve o intervalo dolomítico de topo como extenso, com notável ocorrência de construções estromatolíticas colunares e estromáticas. Observa ainda que porosidade secundária preenchida por calcita e raramente por quartzo também ocorre e que, em direção ao extremo topo da seção, a rocha torna-se menos magnesiânica e mais silicosa, todas essas características apresentam semelhança correlata às rochas da Mineração Bocaina.

Quanto ao modelo deposicional para as rochas da área, admite-se a proposta por Vieira (2007). O autor diz que na porção sul do Cráton São Francisco, a Formação Sete Lagoas alcança mais de 200 m de espessura, compreendendo dois ciclos de caráter retrogradacional - progradacional; esses dois ciclos também são aceitos por Kuchembecker (2011). Esses ciclos, citando Vieira (2007), registram a interação entre as taxas de subsidência, oscilação eustática e deposição de carbonatos em uma rampa. Admite então, que o modelo de rampa carbonática é o que melhor representaria as associações de fácies caracterizadas e a sua paleogeografia (FIGURA 92).

Vieira (2007) apresenta as reconstituições em três estágios de evolução da rampa carbonática: “o reconhecimento de superfícies com significado cronológico e as variações nos padrões de empilhamento das associações de fácies levaram ao

reconhecimento de tratos de sistemas e serviram de base para a correlação das vinte seções estratigráficas medidas.” Dentre as três sequências definidas pelo autor, tendo como base os princípios da estratigrafia de sequências, a última (Sequência 3) compreende o final da deposição dos carbonatos, marcando um limite de sequência e o início da sequência deposicional siliciclástica, a Formação Serra de Santa Helena. Essa mudança abrupta de faciologia não foi observada na Mineração Bocaina.

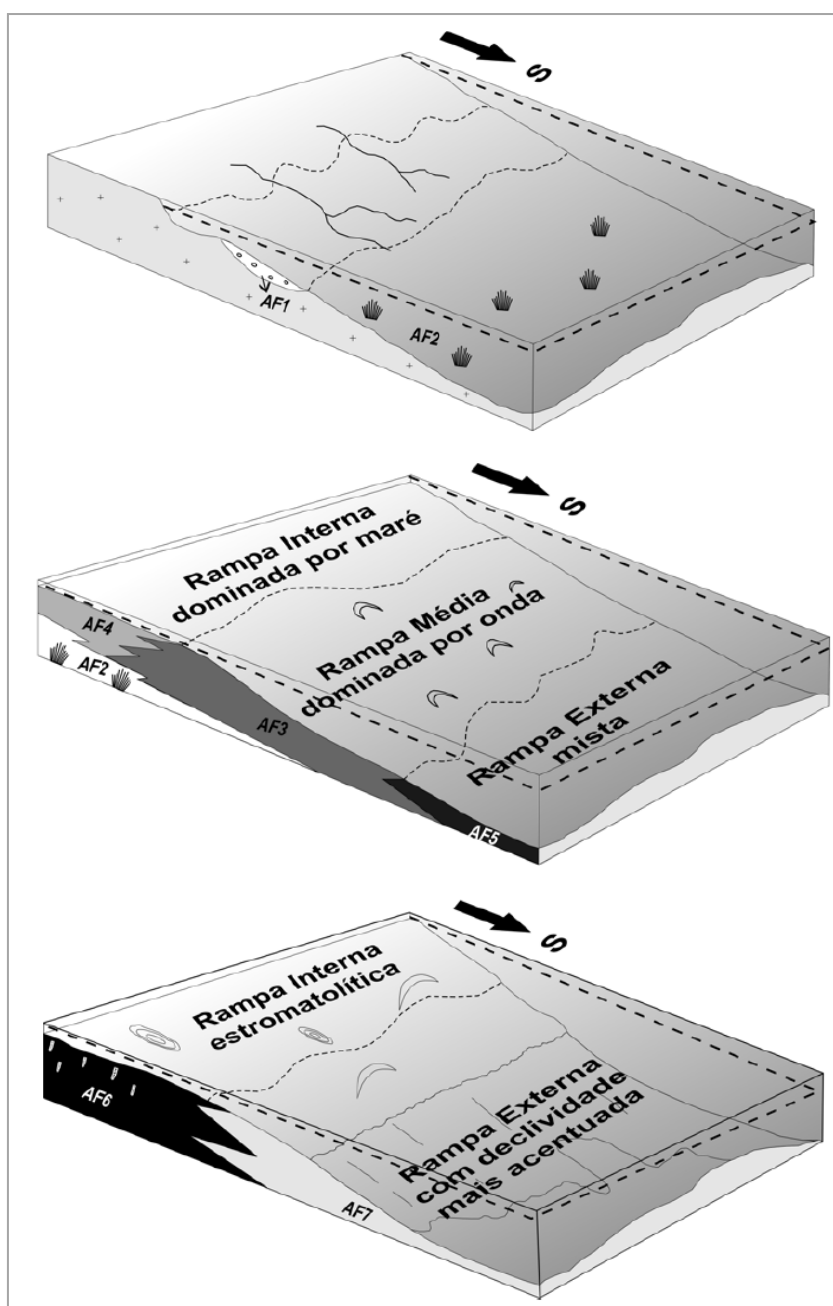


FIGURA 92 – Blocos-diagrama esquemáticos mostrando o modelo deposicional de rampa carbonática proposto para a Formação Sete Lagoas.
FONTE: Vieira (2007).

Kuchembecker (2011) considera coerente com o contexto geotectônico regional, a deposição da seção sedimentar analisada relacionada a pulsos tectônicos da Orogênese Brasileira, durante a formação da Faixa Brasília. Pondera também, que é possível que as variações sejam reflexos das severas mudanças climáticas ocorridas durante e após uma das grandes glaciações do Neoproterozóico, ou ainda, que os dois fatores tenham atuado em conjunto. O autor (*op. cit.*) contribui, a partir do levantamento e interpretação de dados geoquímicos e isotópicos, para as comparações com os dados levantados na Mineração Bocaina, discutidos a seguir.

6.2 UNIDADES INDIVIDUALIZADAS E VARIAÇÕES ISOTÓPICAS

Os perfis geoquímicos do testemunho CSNMA-07-006 apresentados no Capítulo 4, são passíveis de divisão preliminar em pelo menos cinco unidades geoquímicas distintas observadas.

Na Unidade Geoquímica A foram descritas fácies dolomíticas e estromatolíticas com ocorrência de fraturamentos e evidências de dolomitização e carstificação. O topo da Unidade A pode ser considerado um horizonte carstificado, evidenciado pelo aumento nos teores de sílica e correlatos de origem terrígena. As incursões magnesianas provavelmente são reflexos das composições dolomíticas estromatolíticas, nas quais ocorre associada dolomita cristalina, produto de dolomitização.

A Unidade A ou testemunho CSNMA-07-006, correlacionada com os demais testemunhos amostrados no seu topo (CSNMA-07-001, CSNMA-07-0016 e CSNMA-07-0019), permitiu observar as variações laterais geoquímicas. As $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ também apresentam variações que fogem ao padrão observado no restante do furo-guia, de aumento com relativa constância em torno de 0‰ e incursões negativas em direção à base.

Na Unidade Geoquímica B foi descrita uma fácies dolomítica com estromatólitos, fraturamentos, ocorrência de doloespátos e feições de carstificação e também foram descritas fácies calcíticas com e sem evidências de dolomitização, além da fácies dolomítica brechóide, correlata à base da sequência. Os horizontes

magnesianos e correlatos refletem as dolomitizações e carstificação / exposição subaérea, devido ao incremento silicoso terrígeno (sílica, ferro, titânio, etc.).

Na Unidade Geoquímica C foram descritas fácies ricas em estilólitos e com ocorrência frequente de brecha sedimentar. Fraturamentos com feições de dolomitização também foram descritas, associadas à carstificação. O horizonte inicial no Intervalo 4, magnesiano e silicoso, indica geoquimicamente a carstificação que ocorre sobre rochas de fácies dolomítica, descrita em várias escalas.

A intercalação sutil que ocorre em direção à base, de rochas calcíticas e dolomíticas, com incrementos em óxidos oriundos de materiais terrígenos (como potássio, titânio, ferro e os demais que aumentam associadamente), refletem possivelmente a variações ambientais, com aporte de matéria orgânica e material argiloso, encontrados nos estilólitos e matriz das brechas sedimentares.

Na Unidade Geoquímica D, no topo, a variação entre CaO e MgO e a mineralogia siliciclástica encontrada na unidade, permite fazer correspondência com a fácies *mudstone* transicional, descrita na base do Intervalo 5, na qual ocorrem calcissiltitos intercalados ao calcário, porém não configuram ainda a marga. Valores isotópicos gradualmente passam a ser negativos, indicando variação ambiental.

Na Unidade Geoquímica E tem-se a configuração geoquímica da marga, com intercalações cálcicas e silicosas, descrita como *mudstone* com intercalação de calcilutito ou níveis argilo-carbonosos. As incursões negativas preferenciais isotópicas, nos horizontes argilosos com matéria orgânica, indicam o fracionamento diferente, segundo a variação do contexto deposicional e litológico.

As laminações carbonosas encontradas em direção à base da seção, realmente constituem laminações e estratificações diversificadas composicionalmente, indicando contexto deposicional específico e interessante do ponto de vista exploracional de hidrocarbonetos.

Quanto às razões isotópicas, para o $\delta^{13}\text{C}$, observou-se na Mineração Bocaina variação nos valores das razões, com incursões negativas e positivas (FIGURA 93A). Não foram encontradas nas rochas da mineração incursões positivas altas, conforme é descrito em bibliografias regionais (com valores em torno de +10‰), para o topo da seção, isso pode ter ocorrido devido ao fato de a porção dolomítica superior (na qual ocorrem essas incursões) não ser tão espessa, como é descrito bibliograficamente. Assinaturas negativas para o carbono são encontradas de maneira mais frequente ao longo da Unidade Geoquímica A e ao longo da

Unidade Geoquímica E. Na Unidade Geoquímica B são ocasionais e próximas a 0‰. Nas Unidades C e D (entre 65 e 125 m de profundidade) os valores mostram-se constantes, em torno de +1‰. A comparação do perfil isotópico obtido na Mineração Bocaina, com perfis de outras partes da bacia, pode ser visualizada ao final desse capítulo, na FIGURA 95.

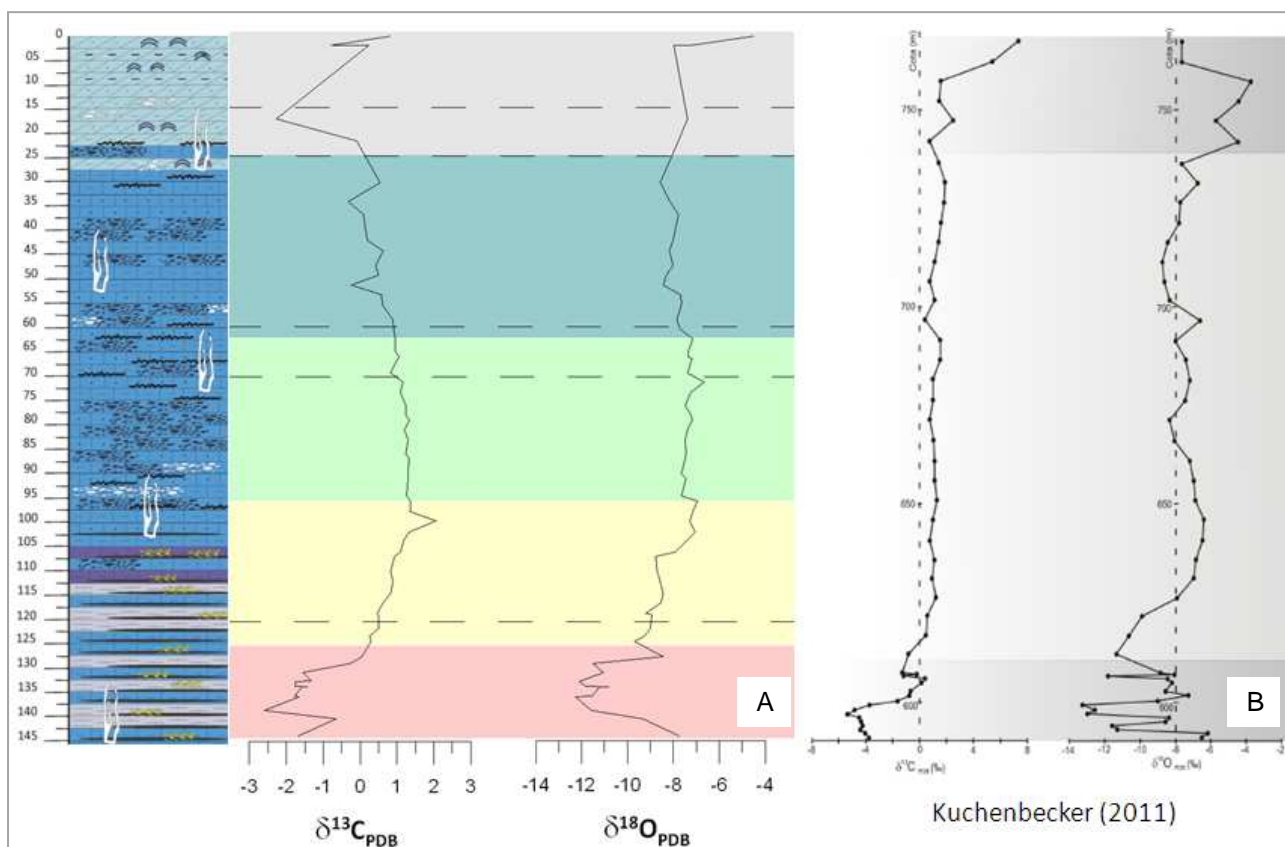


FIGURA 93 – Comparação esquemática de assinaturas isotópicas entre seções com profundidades e faciologias semelhantes. (A) Mineração Bocaina; (B) área próxima, caracterizada por Kuchemberger.

Para a Unidade A, ocorrem assinaturas negativas de carbono nas rochas dos testemunhos 006 (furo-guia) e 001, ou seja, até aproximadamente 25 m de profundidade. Já nas rochas dos demais testemunhos, 0019 e 0016, nas profundidades amostradas, de 3 – 12 m e 15 – 20 m, respectivamente, não foram encontradas incursões negativas no carbono e sim, valores próximos a +1‰. Essas incursões de valores negativos no topo foram encontradas também por Kuchemberger (2011), mas com variações próximas a 0‰ enquanto na Bocaina atingiram até quase -3‰.

Essa constância de valores próximos a +1‰ em duas seções, contrasta com as incursões observadas nas outras duas e pode indicar variações ambientais que

ocorreram, afetando lateralmente o registro isotópico dessas rochas. Para a Unidade E, observam-se valores entre -2,59‰ que gradativamente aumenta em direção ao topo da unidade, até +0,05‰.

Kuchembecker (2011) delimitou três intervalos quimioestratigráficos maiores para a seção que descreveu, dois essencialmente correspondentes ao topo e base e um maior, no meio da seção, a partir dos quais descreveu os valores isotópicos encontrados (FIGURA 93B). No intervalo e nas unidades ainda basais, obteve valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$, que se tornaram mais positivos conforme o avanço em direção ao topo, para próximo de 0‰.

No intervalo médio descreve (*op. cit.*) resultados mais homogêneos, em torno de +1‰ ao longo de todo intervalo. No intervalo dolomítico de topo, descreve uma forte excursão positiva nos valores de $\delta^{13}\text{C}$, que passam de +2‰ para +7,5‰.

Segundo Vieira (2007) que também encontrou variações ao longo da unidade, nas seções amostradas pelo autor, há valores negativos na base de uma das sequências e valores fortemente positivos no topo de outra sequência; em uma das sequências do autor pôde ser observada a mudança do sinal.

De acordo com o autor (*op. cit.*) assinaturas isotópicas em torno de 0‰ podem ser interpretadas como representativas de uma assinatura oceânica normal. A transição de valores negativos para valores próximos a 0‰, marcaria uma importante mudança ambiental, quando a transgressão marinha inundou a plataforma e o sedimento passa então, a registrar o sinal isotópico do oceano, e não mais de um ambiente restrito.

Para o $\delta^{18}\text{O}$, foram observados na Mineração Bocaina valores entre -12‰ e -5‰, sendo que as rochas com valores mais depletados em oxigênio são as da base da seção, mais ricas em matéria orgânica (na fácies correspondente à que Vieira, 2007, descreve com aragonita), na Unidade Geoquímica E. Essas variações podem ser observadas na FIGURA 93A.

Kuchembecker (2011) descreve variações de $\delta^{18}\text{O}$ extremamente heterogêneas para o intervalo basal, com valores de até -15‰ (FIGURA 93B). No intervalo médio, esses valores possuem oscilação suave entre -6 e -8,5‰. No intervalo de topo com composição dolomítica, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ também apresentaram forte excursão positiva, como foi verificado para o $\delta^{13}\text{C}$, passando de -8‰ até cerca de -3‰, retornando a -8‰ nos metros finais da seção.

Vieira (2007) descreve, para as rochas das seções estudadas, um amplo intervalo de variação para o $\delta^{18}\text{O}$, desde -14‰ até -6‰. Nas amostras da base de uma das seções, nas quais ocorrem leques de aragonita (não observados nas seções analisadas na Mineração Bocaina), ela descreve valores de -9,9‰. Ressalta, porém, que não há uma coerência ao longo da estratigrafia e sugere que a assinatura primária das fácies foi alterada. Segundo o autor, valores de $\delta^{18}\text{O}$ muito empobrecidos sugerem que a assinatura isotópica de oxigênio da Formação Sete Lagoas é produto de alteração diagenética.

Martins (1999) encontrou valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$, em torno de -5‰, na base do Grupo Bambuí, associando-os às fácies dolomíticas avermelhadas pós-sedimentos glaciogênicos; esse padrão foi comprovado regionalmente pelo autor como uma anomalia isotópica negativa de expressão regional. A partir dessa anomalia, carbonatos basais apresentaram assinaturas positivas entre 0‰ e +5‰, sendo que na direção nordeste o enriquecimento é gradual para +5‰ e na direção oeste, é constante em aproximadamente 0‰.

Vieira (2007) defende que a excursão negativa de carbono registrada na base da Formação Sete Lagoas é produto de um ambiente restrito, não representando a assinatura de $\delta^{13}\text{C}$ do oceano; segundo o mesmo, isso suscita ressalvas quanto ao uso da assinatura isotópica de carbono como vínculo de correlação global das sequências carbonáticas neoproterozóicas.

Os valores de 0‰ a +5‰, encontrados por Martins (1999) foram sucedidos por um salto isotópico para valores próximos a +10‰. Levando em conta que não existem grandes lacunas no registro sedimentar dos perfis, esse salto isotópico que ocorre repetidamente e de maneira abrupta, regionalmente, representaria uma marco cronoestratigráfico ou discordância. Isso é corroborado por características descritivas de ambiente raso e mais restrito, com exposições aéreas.

Quanto à $\delta^{18}\text{O}$, Martins (1999) descreve que ocorre um enriquecimento em direção ao topo do Grupo Bambuí e, que isso poderia ser interpretado como resultante de uma taxa de evaporação mais alta que precipitação. Essas condições concordariam com o quadro paleogeográfico proposto pela autora, de rampa distalmente escarpada, com áreas rasas prolíferas em microbialitos.

Ao final, Martins (1999) conclui que, segundo a curva isotópica generalizada para o carbono do Meso-Neoproterozóico, que consta em Kah *et al.*, 1998, os carbonatos da base do Grupo Bambuí têm boa correlação a partir das primeiras

excursões negativas do Neoproterozóico, em 1000 Ma. Uma vez que valores fortemente positivos de $\delta^{13}\text{C}$ só começam a prevalecer ao final do Neoproterozóico (*op. cit.*), a partir de 700 Ma, fica então assinalada a discordância entre os carbonatos de base e topo do Grupo Bambuí.

Algumas características nas rochas carbonáticas neoproterozóicas, como os leques de cristais de aragonita e as incursões negativas para o carbono, permitem classificá-las como carbonatos de capa, de um contexto deposicional pós-glacial. Kuchembecker (2011), admite que a seção descrita pelo mesmo encaixa-se nesse contexto.

Santos *et al.* (2004) verificaram que na maioria das seções analisadas, foi observada uma variação com tendência fixa de alta variação $\delta^{13}\text{C}$ - acima de 12.4‰. Em uma das seções analisadas pelo autor, o limite entre os carbonatos do Bambuí e os diamictitos da Formação Jequitáí é marcado por valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ de +7.7‰ e -15,4‰, respectivamente. Valores baixos de $\delta^{13}\text{C}$ são associados com eventos glaciais, enquanto valores altos são usualmente explicados em termos de altas taxas de soterramento da matéria orgânica, que é enriquecida em reservatórios residuais de carbono.

A correspondência com a compilação de dados isotópicos obtidos na bacia, que se encontra em Santos *et al.* (2004) e foi comparada por Kuchembecker (2011), pode ser visualizada na FIGURA 94. O perfil de $\delta^{13}\text{C}$ pode ser comparado tendo como base ou *datum* a excursão positiva. Para Kuchembecker (2011) o salto isotópico positivo ocorre coincidentemente junto com o início da predominância de dolomititos. Na Bocaina, o salto isotópico positivo que permite a correlação com as assinaturas isotópicas da bacia, ocorre nos primeiros 5 m no extremo topo da seção (no nível dolomítico), com valores que aumentam gradacionalmente a partir de 0‰; essa incursão positiva pode ser observada em detalhe na FIGURA 95.

Segundo Sanches *et al.* (2007), a partir da base da seqüência carbonática do Grupo Bambuí, a composição de $\delta^{13}\text{C}$ aumenta progressivamente para o topo. Na base da Formação Sete Lagoas ela passa de valores baixos, em torno de -4‰ C_{PDB} até +16‰ no topo da Formação Lagoa do Jacaré. Por outro lado, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ das mesmas amostras são dispersos, não exibindo qualquer tendência.

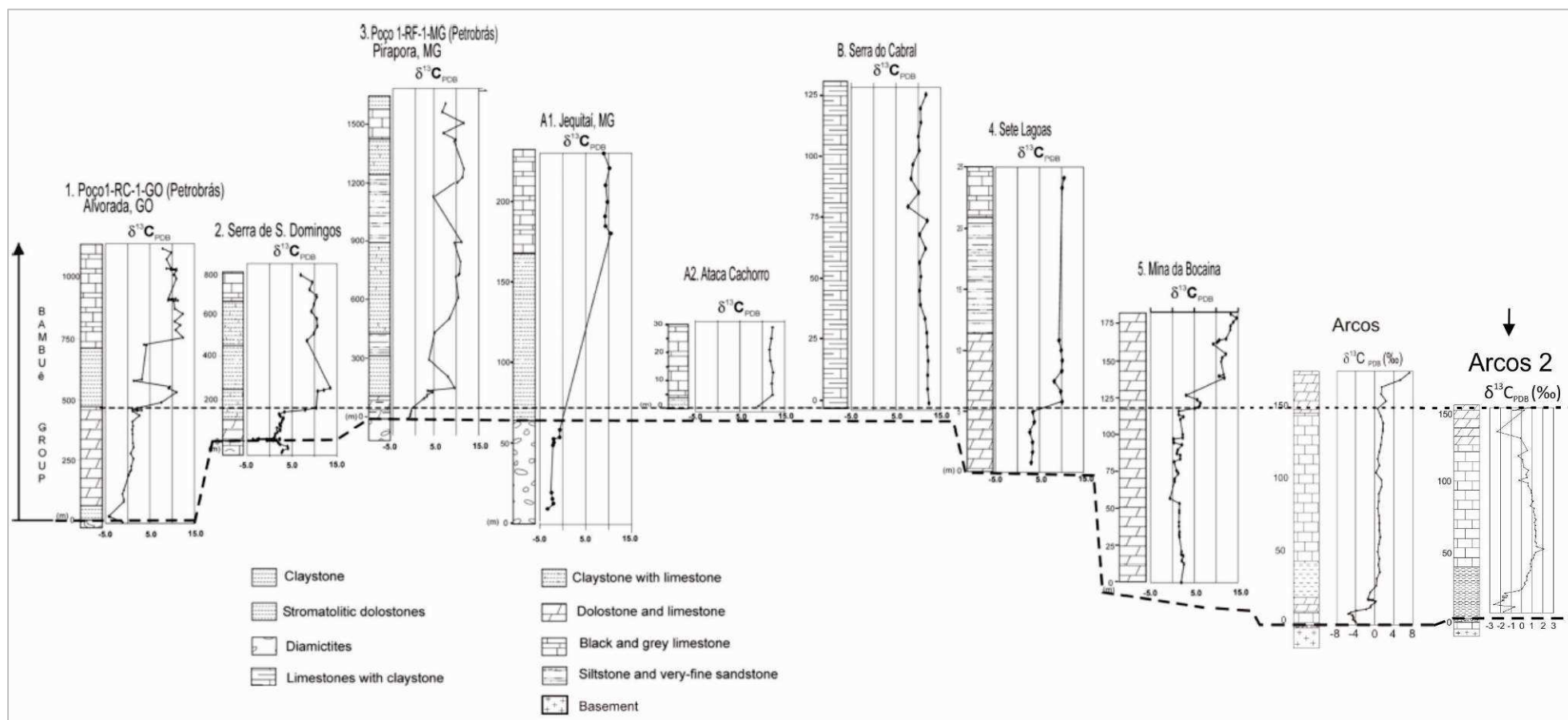


FIGURA 94 – Comparação dos perfis isotópicos de diversas partes da bacia, tendo como *datum*, a excursão positiva dos valores de $\delta^{13}\text{C}$. A seção identificada “Arcos 2” representa o perfil isotópico obtido nessa pesquisa.

FONTE: Modificado de Kuchembecker (2011).

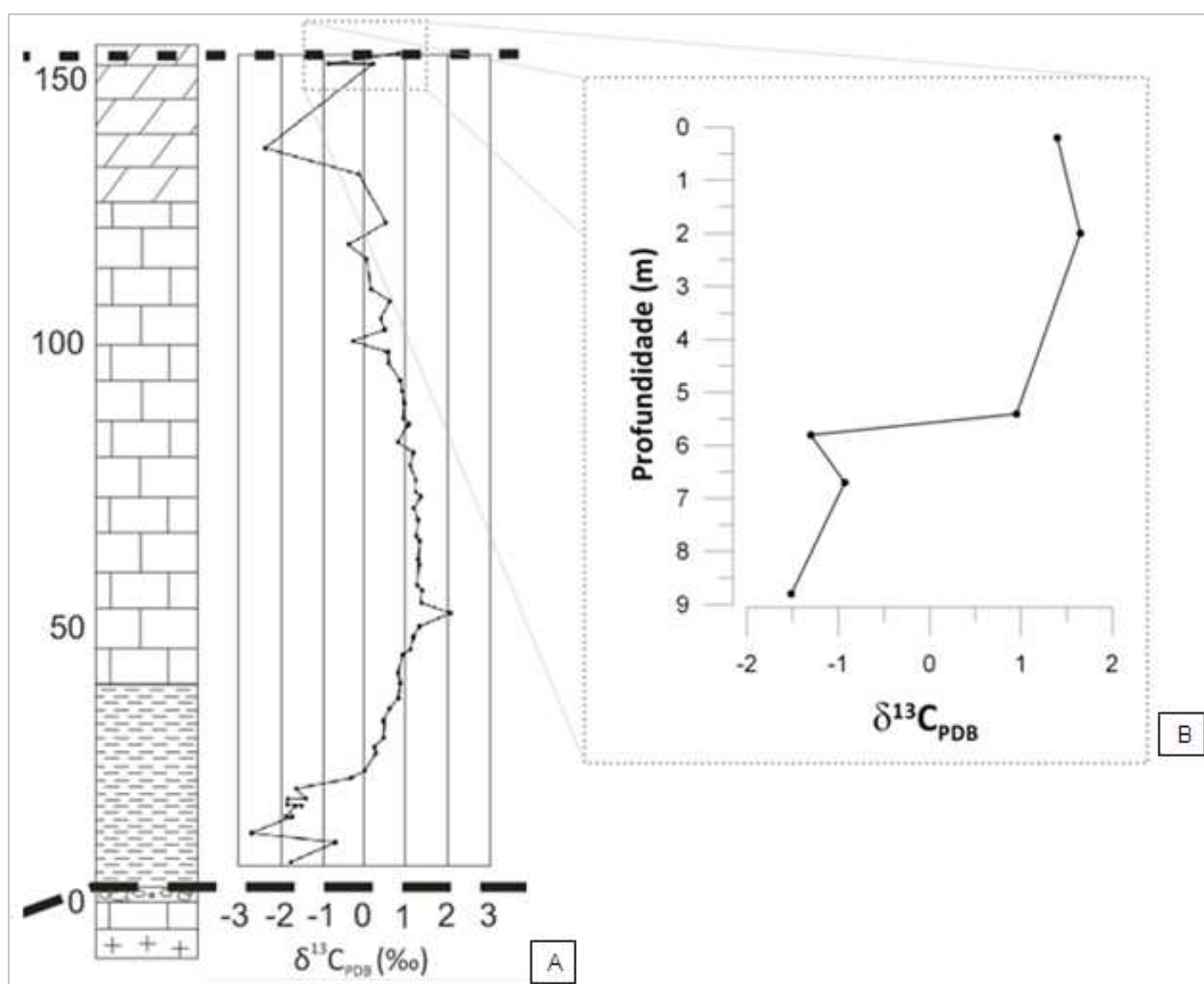
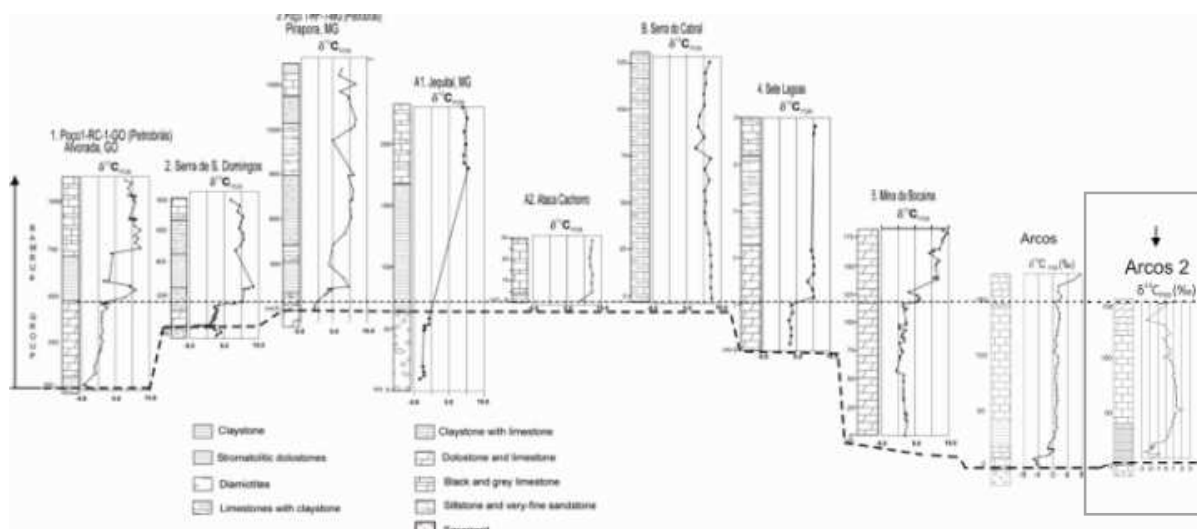


FIGURA 95 – Detalhe do início da incursão isotópica positiva conforme é observado destacado no furo-guia (A), obtido no testemunho 001 (B).
FONTE: O autor (2011).

Para os estudos de alteração diagenética, é comum fazer uso da razão Mn/Sr e do conteúdo de Mn. Para a razão (para a qual todas as amostras analisadas mostraram-se dentro dos limites aceitáveis para rochas inalteradas, segundo KAUFMAN E KNOLL, 1995) foi observada constância de valores. Um aumento significativo foi observado nas rochas basais semelhantes, descritas na Mineração Bocaina e na seção de Kuchembecker (2011), provavelmente devido ao aumento de material terrígeno.

Observou-se, próximo ao topo da Unidade Geoquímica E, e na Unidade 3 de Kuchembecker (2011), elevação dos teores de Mn, sugerindo dolomitização dessas rochas com ação de fluidos ricos em Mn, pois, de acordo com Jacobsen e Kaufmann (1999), o aumento de Mn nos carbonatos pode indicar interação da rocha com fluidos ricos nesse elemento.

Kuchembecker (2011) descreve uma relação entre o aumento e a diminuição de teores de Mn (%) *versus* $\delta^{18}\text{O}$ conforme Kah (2000): “(...) durante o processo diagenético pode haver diminuição dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ com respectivo aumento dos teores de Mn, caso ocorra interação com fluidos isotopicamente mais leves, como água doce (água meteórica ou mistura de ambas). No caso de interação com fluidos isotopicamente mais pesados (salmouras evaporíticas, água intersticial ascendente) haveria um aumento dos valores de $\delta^{18}\text{O}$.”

Abaixo, uma comparação entre as amostras do autor (*op. cit.*) que não seguem nenhuma das direções ou tendências (FIGURA 96A), sugerindo que processos diagenéticos atuantes não tiveram influência de fluidos com suas características, e amostras da Bocaina (FIGURA 96B), que em sua maioria não apresentam tendência, mas variam preferencialmente em direção à seta A. Essa tendência, portanto, pode indicar aumento da interação com fluidos isotopicamente mais leves, como água doce, meteórica ou mistura de ambas.

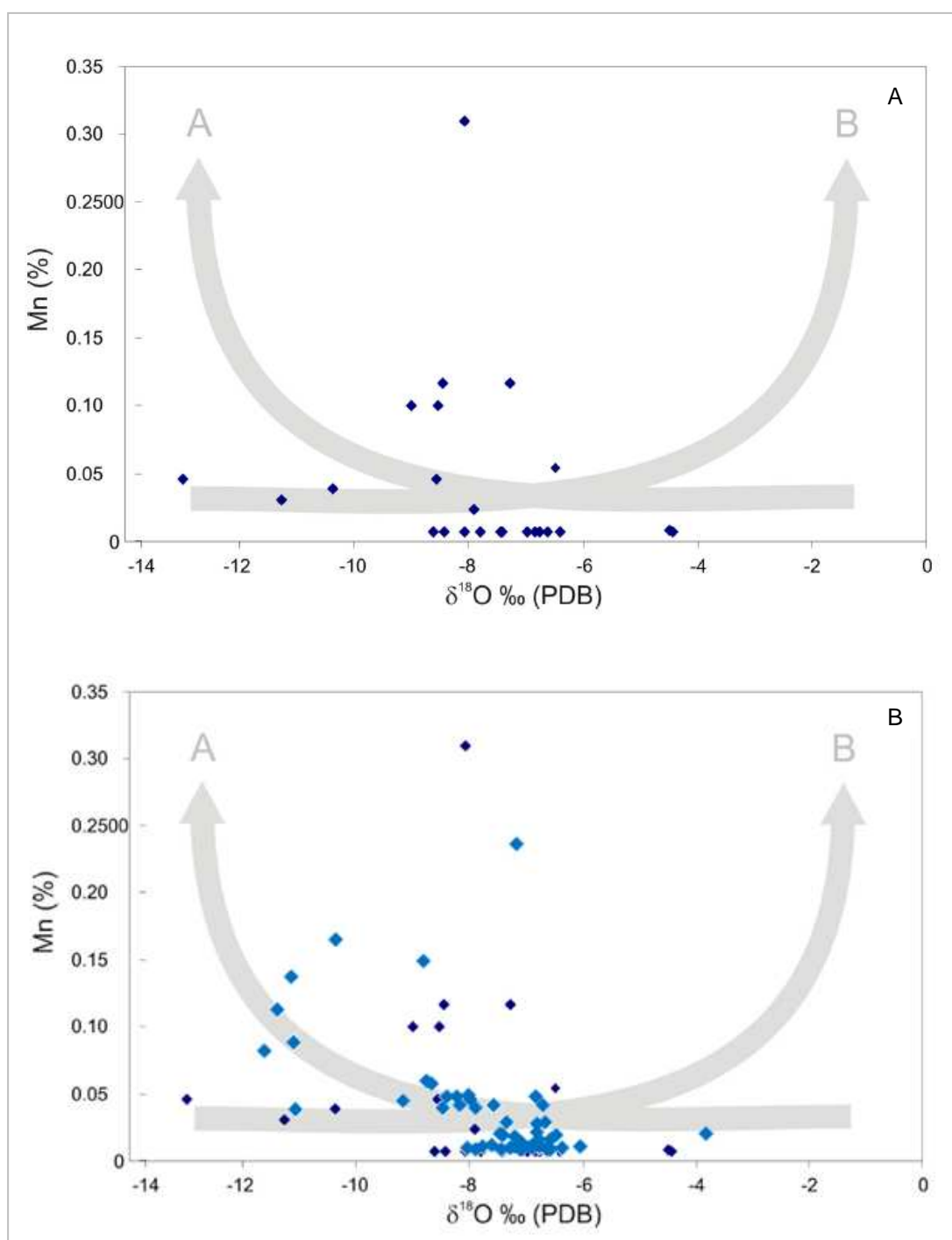


FIGURA 96 – Comparação da relação entre os teores de MnO e os valores de $\delta^{18}\text{O}$ dos carbonatos. (A) área próxima, caracterizada por Kuchembecker; (B) valores obtidos na Mineração Bocaina, na cor azul claro, sobrepostos.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A variação composicional que ocorre na mineração e era classificada genericamente foi compreendida do ponto de vista geoquímico e mineralógico, através da análise da seção estratigráfica, descrições petrográficas e perfis geoquímicos. A separação dos intervalos em unidades geoquímicas permitiu visualizar melhor as variações geoquímicas que ocorrem ao longo da área da mineração.

A caracterização dos testemunhos comparada aos dados existentes na mineração mostrou a homogeneidade das litologias presentes. O nível de detalhamento geológico e as análises geoquímicas podem ser usados pela empresa de maneira prática na rotina de trabalho para a exploração de calcário, com todas as informações cuidadosamente referenciadas em seus respectivos testemunhos e frentes de lavra.

A variação química encontrada é uma preocupação constante para a mineração e os intervalos utilizados pela mesma na lavra do minério, têm pouca correspondência com as unidades geoquímicas definidas. Observou-se ainda que a ocorrência da brecha calcítica no nível dolomítico superior (Unidade Geoquímica C) baixa o teor de MgO do mesmo, melhorando a qualidade do calcário para a exploração.

As características descritas sugerem a necessidade de estudos geoquímicos mais detalhados com mapeamento das ocorrências anômalas (como a brecha calcítica, descrita também em região próxima), possibilitando um melhor aproveitamento da matéria-prima. Uma reavaliação do modelo de exploração com implementações, tais como mudança da cota de base para retirada do minério, ocasionariam possivelmente uma maior sobrevida da mineração, com maior suprimento de calcário para as indústrias.

O conhecimento faciológico e geoquímico das rochas da base do Grupo Bambuí na localidade de Arcos, permitiu comparações e correlações com dados regionais (bibliográficos) e mostrou grande similaridade com os dados faciológicos e geoquímicos da Formação Sete Lagoas.

As rochas da Unidade Geoquímica E parecem ser correlatas às rochas basais descritas regionalmente, com relevante conteúdo de matéria orgânica

semelhantes a folhelhos e com assinaturas geoquímicas distintivas. Essas características, aliadas às notícias de ocorrências de exsudações de gás e óleo na bacia e concessão de blocos para pesquisa em localidades vizinhas a Arcos, tornam essas rochas interessantes do ponto-de-vista de potenciais geradoras de hidrocarbonetos. Recomendam-se pesquisas específicas para avaliação de conteúdo e composição da matéria orgânica, que permitam compará-la com as possíveis rochas geradoras da Bacia do São Francisco, a nível regional.

Algumas características descritas no nível superior dolomítico, como a ocorrência de fraturamentos com veios e brechas aparentemente associados à porosidade e microporosidade; a ocorrência local e regional de carstificação e grutas e as unidades superiores à Sete Lagoas compostas por calcários, folhelhos e argilitos, permitem pensar nessas rochas como possíveis armazenadoras. Esses eventos de fraturamento e porosidade, aparentemente associados no nível estromatolítico, poderiam ser estudados quanto à ocorrência regional, variações, tipos de porosidade e *timing* com a geração dos hidrocarbonetos, verificando a viabilidade dessa hipótese.

As tendências de assinaturas isotópicas encontradas em três momentos ao longo da seção (unidade de topo dolomítica, calcário calcítico e unidade de base pelítica carbonosa), são semelhantes às tendências descritas por Kuchembecker (2011) em seção descrita em uma área próxima à mineração, também são semelhantes aos padrões isotópicos de sequências pós-glaciais em diversas partes do mundo, que relatam uma excursão positiva para o carbono.

Ressalta-se, no entanto, que apesar de obtido valores positivos crescentes de $\delta^{13}\text{C}$ em direção ao topo da seção, não foram encontrados os valores fortemente positivos descritos regionalmente (de +10‰ - +15‰) na unidade estromatolítica e também não foram encontrados os dolomitos rosados na base da seção contendo leques de pseudomorfos de aragonita.

Para os doloespato foi possível verificar uma tendência nos valores de carbono e oxigênio, e além da possibilidade de origem diagenética, há também a possibilidade de origem hidrotermal, devido à depleção em $\delta^{18}\text{O}$, quando comparado com os valores obtidos para as dolomitas da Unidade Geoquímica A. Contudo faltam dados para afirmação da segunda possibilidade, como características petrográficas distintivas consistentes, como a dolomita em sela.

Na Unidade Geoquímica C, a brecha calcítica encontrada foi correlacionada e parece ter ocorrência regional. Há dúvidas sobre a sua origem e faltam dados (estruturais, petrográficos e isotópicos) regionais e em quantidade que possibilitem afirmar uma origem hidrotermal. Foi encontrada grande variação dos valores isotópicos, tanto para o carbono quanto para o oxigênio, e isso dificulta ou mascara as tendências de assinatura que podem existir para a brecha.

REFERÊNCIAS

ADAMS A. E., MACKENZIE W. S., GUILFORD C. **Atlas of sedimentary rocks under the microscope**. UK: Longman Group, 1988.

ALKMIM F. F., KIANG C. H., MAGALHÃES L., MIRANDA F. P. Considerações sobre a Evolução Tectônica da Bacia do São Francisco. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35. 1988. Belém. **Anais...** Belém, PA. 1988. p. 2076-2082.

ALKMIM, F. F.; BRITO-NEVES, B. B.; ALVEZ, J. A. C. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco – uma revisão. In: DOMINGUEZ, J. M. L.; MISI, A. (ed). **Trabalhos apresentados na reunião preparatória do II simpósio sobre o Cráton São Francisco**. Salvador, BA. 1993. p 45-62.

ALKMIM, F. F. O que faz de cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações Almeidianas ao delimitá-lo. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; DAL-RE, C. C.; BRITO-NEVES, B. **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques Almeida**. São Paulo: Editora Beca, 2004. p. 17-35.

ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, Paraná, v. 7, n. 4, p. 349-364. 1977.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. **O Pré-Cambriano no Brasil**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1984.

ALVES, R. J. Bacias sedimentares: potencial petrolífero da América do Sul. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 3, n. 4, p. 321-336. 1989.

BABINSKI, M. **Idades isocrônicas de Pb/Pb e geoquímica isotópica de Pb das rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, na porção sul da Bacia do São Francisco**. 152 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.

BABINSKI, M.; VIEIRA, L. C.; TRINDADE, R. I. F. Direct dating of the Sete Lagoas cap carbonate (Bambui Group, Brazil) and implications for the Neoproterozoic glacial events. **Terra Nova**, Blackwell Science, v. 19, n. 6, p. 401-406. 2007.

BABINSKI, M.; SCHMUS, W. R. V.; CHEMALE, F. Pb/Pb dating and Pb isotope geochemistry of Neoproterozoic carbonate rocks from the São Francisco basin, Brazil: implications for the mobility of Pb isotopes during tectonism and metamorphism. **Chemical Geology**, v. 160, p. 175-199. 1999.

BABINSKI, M.; KAUFMAN, A. J. **First direct dating of a Neoproterozoic post-glacial cap carbonate**. In: South-American Symposium on Isotope Geology, 4., 2003. Salvador, Brazil. p. 321–323.

CAXITO, F. A.; HALVERSON, G. P.; UHLEIN, A.; STEVENSON, R.; DIAS, T.G.; UHLEIN, G.J. Marinoan glaciation in east central Brazil. **Precambrian Research**. No prelo. Disponível em <[doi:10.1016/j.precamres.2012.01.005](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.01.005)> Acesso em 02/02/2012.

CRAIG, J.; THUROW, J.; WHITHAM, A.; THUSU, B.; ABUTARRUMA, Y. **Global neoproterozoic petroleum systems: the emerging potencial in North Africa**, London, v. 326. 2009.

DICKSON, J. A. D. Carbonate identification and genesis as revealed by staining. **Journal of Sedimentary Petrology**, Geo Science World, v. 36, n. 2, p. 491-505, 1966.

EVANS, J.; CADE, C.; BRYANT, S. A geological approach to permeability prediction in clastic reservoirs. In: KUPECZ, J. A.; GLUYAS, J. G.; BLOCH, S. **Reservoir quality prediction in sandstones and carbonates**. v. 11, p 91-101, 1998.

FAURE, G.; MENSING T. M. **Isotopes: Principles and Applications**. 3. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 1986.

FETTES, D.; DESMONS, J. **Metamorphic rocks. A classification and glossary of terms**. Cambridge: IUGS, 2007.

FLÜGEL, E. **Microfacies of carbonate rocks. Analysis, interpretation and application**. Netherlands: Springer. 2009.

GAMA, R. M. A. **Estratigrafia de alta resolução aplicada ao Eodevoniano da Bacia do Paraná na região de Jaguariaíva – PR**. Monografia de Graduação. Faculdade de Geologia, Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GARDOLINSKI, J. E. F. C. **Quantificação de dolomita e calcita em rochas carbonáticas por análise termogravimétrica**. Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da UFPR, Inédito, Curitiba, 2008.

HOFFMAN, P. F. The break-up of Rodinia, birth of Gondwana, true polar wander and the snowball earth. **Journal of African Earth Sciences**, v. 28, n. 1, p. 17-33, 1999.

HOFFMAN, P. F.; SCHRAG, D. P. The snowball earth hypothesis: testing the limits of global change. **Terra Nova**, Blackwell Science, v. 14, n. 3, p. 129–155, 2002.

IYER, S. S.; BABINSKI, M.; KROUSE, H. R.; CHEMALE JR., F. Highly ^{13}C - enriched carbonate and organic matter in the Neoproterozoic sediments of the Bambuí Group, Brazil. **Precambrian Research**, v. 73, p. 271-282, 1995.

JACOBSEN, S. B.; KAUFMAN, A. J. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater. **Chemical Geology**, v. 161, p. 37–57, 1999.

KAUFMAN, A. J.; KNOLL, A. H. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications. **Precambrian Research**, v. 73, p. 27-49, 1995.

KAUFMAN, A. J.; VARNI, M. A.; MISI, A.; BRITO-NEVES, B. B. **Anomalous $\delta^{34}\text{S}$ signatures in trace sulfate from a potential cap carbonate in the Neoproterozoic Bambuí Group**. In: IGCP 450 Meeting, Proceedings, Belo Horizonte, 2001. p. 62-65.

KNOLL, A. H.; WALTER, M. R. Late Proterozoic stratigraphy and earth history. **Nature**, v. 356, p. 673-678, 1992.

KOUTSOUKOS, E. A. M. **Applied stratigraphy**. Netherlands: Springer, 2005.

KUCHEMBECKER, M. **Quimioestratigrafia e proveniência sedimentar da porção basal do Grupo Bambuí em Arcos (MG)**. 91 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LOPES, J. N. **Faciologia e gênese dos carbonatos do Grupo Bambuí na região de Arcos, estado de Minas Gerais**. 166 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

MARTINS, M. **Análise estratigráfica das sequências mesoproterozóicas (borda oeste) e neoproterozóicas da Bacia do São Francisco.** 214 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

MARTINS-NETO, M. A.; PINTO, C. P. **Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais.** Belo Horizonte: SBG – Núcleo de Minas Gerais, 2001.

MILANI, E. J.; RANGEL, H. D.; BUENO, G. V.; STICA, J. M.; WINTER, W. R.; CAIXETA, J. M.; NETO, O. C. P. Bacias sedimentares brasileiras – Cartas estratigráficas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 183-205, 2007.

MISI, A. Estratigrafia isotópica das sequências do Supergrupo São Francisco. In: MARTINS-NETO, M. A.; PINTO, C. P. **Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais**, Belo Horizonte, SBG – Núcleo de Minas Gerais, 2001, p. 67-92.

MISI, A.; KAUFMAN, A. J.; VEIZER, J.; POWIS, K.; AZMY, K.; BOGGIANI, P. C.; GAUCHER, C.; TEIXEIRA, J. B. G.; SANCHES, A. L.; IYER, S. S. S. Chemostratigraphic correlation of Neoproterozoic successions in South America. **Chemical Geology**, v. 237, p. 143-167, 2007.

POSAMENTIER, H. W.; WALKER, R. G. **Facies Models Revisited.** Special Publication 64. Oklahoma: Society for Sedimentary Geology – SEPM, 2006.

RIDING, R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial–algal mats and biofilms. **Sedimentology**, v. 47, n. 1, p. 179–214. 2000.

RODRIGUES, R. Chemostratigraphy, *in*: KOUTSOUKOS, E. A. M. (ed). **Applied stratigraphy.** Springer. Netherlands. p 165-178. 2005.

SANCHES, A. L.; MISI, A.; KAUFMAN, A. J.; AZMY, K. As sucessões carbonáticas neoproterozóicas do Cráton São Francisco e os depósitos de fosfato: correlações e fosfogênese. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 37, n. 4, suplemento, p. 182-194. 2007.

SANTOS R. V. ALVARENGA C. J. S., DARDENNE M. A., SIAL A. N., FERREIRA V. P. Carbon and oxygen isotope profiles across Meso-Neoproterozoic limestones from Central Brazil: Bambuí and Paranoá Groups. **Precambrian Research**, v. 104, p. 107-122. 2000.

SANTOS, R. V.; ALVARENGA, C. J. S.; BABINSKI, M.; RAMOS, M. L. S.; CUKROV, N.; FONSECA, M. A.; SIAL, A. N.; DARDENNE, M. A.; NOCE, C. M. Carbon isotopes of Mesoproterozoic-Neoproterozoic sequences from southern São Francisco Craton and Araçuaí Belt, Brazil: paleogeographic implications. **Journal of South American Earth Sciences**. v. 18, p. 27-39. 2004.

SCHOLLE, P. A.; ULMER-SCHOLLE, D. S. **A color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis**. AAPG Memoir 77. AAPG. Tulsa, Oklahoma, USA. 459 pp. 2003.

TERRA, G. J. S.; SPADINI, A. R.; FRANÇA, A. B.; SOMBRA, C. L.; ZAMBONATO, E. E.; JUSCHAKS, L. C. S.; ARIENTI, L. M.; ERTHAL, M. M.; BLAUTH, M.; FRANCO, M. P.; MATSUDA, N. S.; SILVA, N. G. C.; MORETTI Jr., P. A.; D'ÁVILA, R. S. F.; SOUZA, R. S.; TONIETTO, S. N.; ANJOS, S. M. C.; CAMPINHO, V. S.; WINTER, W. R. Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 18, n. 1, p. 9-29. 2009.

TOSCA, N. J.; JOHNSTON, D. T.; MUSHEGIAN, A.; ROTHMAN, D. H.; SUMMONS, R. E.; KNOLL, A. H. Clay mineralogy, organic carbon burial, and redox evolution in Proterozoic oceans. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 74, p. 1579–1592. 2010.

VIEIRA L. C. **A Formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí) e as variações paleoambientais no final do Proterozóico**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. São Paulo. 198 pp. 2007.

VISCO, G.; CAMPANELLA, L.; NOBILI, V. Organic carbons and TOC in waters: an overview of the international norm for its measurements. **Microchemical Journal**, v. 79, p. 185–191. 2005.

WALTER, M. R. (ed.) **Stromatolites**. Developments in Sedimentology 20. Amsterdam, The Netherlands. 1976.

ZALÁN, P. V.; ROMEIRO-SILVA, P. C. Bacia do São Francisco. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 561-571. 2007.

APÊNDICE 1

1.1 – Tabela de análises químicas (elementos maiores) do testemunho CSNMA-07-006.....	133
1.2 – Tabela de análises químicas (elementos-traço e razões elementares) do testemunho CSNMA-07-006.....	135
1.3 – Tabela de análises mineralógicas por quantificação da difração de raios X, do testemunho CSNMA-07-006.....	137
1.4 – Tabela de análises isotópicas do testemunho CSNMA-07-006.....	139

APÊNDICE 2

2.1 – Tabela de análises químicas (elementos maiores) do testemunho CSNMA-07-001.....	140
2.2 – Tabela de análises químicas (elementos-traço e razões elementares) do testemunho CSNMA-07-001.....	140
2.3 – Tabela de análises mineralógicas por quantificação da difração de raios X, do testemunho CSNMA-07-001.....	141
2.4 – Tabela de análises isotópicas do testemunho CSNMA-07-001.....	141

APÊNDICE 3

3.1 – Tabela de análises químicas (elementos maiores) do testemunho CSNMA-07-0016.....	142
3.2 – Tabela de análises químicas (elementos-traço e razões elementares) do testemunho CSNMA-07-0016.....	142
3.3 – Tabela de análises mineralógicas por quantificação da difração de raios X, do testemunho CSNMA-07-0016.....	143
3.4 – Tabela de análises isotópicas do testemunho CSNMA-07-0016.....	143

APÊNDICE 4

4.1 – Tabela de análises químicas (elementos maiores) do testemunho CSNMA-07-0019.....	144
4.2 – Tabela de análises químicas (elementos-traço e razões elementares) do testemunho CSNMA-07-0019.....	144
4.3 – Tabela de análises mineralógicas por quantificação da difração de raios X, do testemunho CSNMA-07-0019.....	145
4.4 – Tabela de análises isotópicas do testemunho CSNMA-07-0019.....	145

APÊNDICE 1.1 – Tabela de análises químicas (elementos maiores) do testemunho CSNMA-07-006

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	CaO (%)	MgO (%)	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	Na2O (%)	K2O (%)	TiO2 (%)	MnO (%)	P2O5 (%)
TACX1 01	2	31,48	20,87	1,74	0,04	0,15	0,04	0,03	0,005	0,013	0,007
TACX2 03	5A	33,69	19,2	0,89	0,04	0,15	0,06	0,03	0,005	0,021	0,014
TACX2 03	5B	52,15	3,5	0,55	0,01	0,07	0,15	0,03	0,002	0,012	0,007
TACX3 04	20	46,67	8,25	0,24	0,02	0,14	0,12	0,02	0,003	0,02	0,035
TACX4 05	22	55,17	0,93	0,11	0	0,06	0,14	0,01	0,003	0,004	0,062
TACX6 07	26	54,16	1,39	0,55	0,17	0,1	0,14	0,07	0,014	0,003	0,119
TACX7 08	27	50,75	4,41	0,42	0,05	0,21	0,12	0,04	0,009	0,033	0,48
TACX8 09	28	52,8	2,1	1,06	0,26	0,19	0,13	0,09	0,018	0,011	0,2
TACX9 10	29	51,39	3,36	0,99	0,17	0,17	0,12	0,08	0,013	0,013	0,078
TACX10 11	30	53,07	1,97	0,79	0,14	0,12	0,14	0,07	0,011	0,005	0,063
TACX11 12a	31	55,63	0,28	0,41	0,03	0,08	0,15	0,03	0,006	0,002	0,056
TACX11 12b	32	55,34	0,25	0,54	0,08	0,08	0,15	0,04	0,007	0,004	0,101
TACX12 13a	33	55,15	0,29	0,55	0,11	0,11	0,15	0,06	0,01	0,002	0,082
TACX12 13b	34	55,12	0,55	0,54	0,09	0,1	0,14	0,05	0,009	0,002	0,066
TACX13 14a	35	52,77	2,07	1,07	0,14	0,14	0,13	0,07	0,012	0,002	0,081
TACX13 14b	36	51,55	2,93	1,64	0,22	0,18	0,13	0,1	0,015	0,003	0,03
TACX14 15a	39	52,24	1,56	2,83	0,58	0,29	0,14	0,22	0,032	0,004	0,136
TACX14 15b	40	53,88	0,97	1,93	0,26	0,16	0,15	0,13	0,016	0,002	0,078
TACX15 16a	45	52,56	1,12	3,02	0,68	0,35	0,15	0,27	0,043	0,004	0,097
TACX15 16b	46	47,97	1,96	7,53	1,9	0,88	0,14	0,64	0,093	0,009	0,233
TACX16 17a	47	52,81	0,82	4,2	0,64	0,35	0,15	0,23	0,045	0,003	0,071
TACX16 17b	48	45,57	2,44	9,5	2,56	1,21	0,18	0,87	0,145	0,014	0,196
TACX17 18a	49	52,03	2,56	1,35	0,24	0,22	0,13	0,11	0,019	0,004	0,034
TACX17 18b	50	54,61	0,53	1,26	0,22	0,16	0,14	0,09	0,016	0,001	0,08
TACX18 19a	51	54,37	0,67	1,07	0,13	0,14	0,15	0,07	0,013	0,001	0,056
TACX18 19b	52	53,35	0,79	2,43	0,5	0,29	0,15	0,21	0,035	0,002	0,103
TACX19 20a	53	51,96	1,15	3,58	0,87	0,37	0,16	0,3	0,043	0,004	0,129
TACX19 20b	54	54,79	0,52	0,96	0,17	0,14	0,15	0,08	0,012	0,002	0,038
TACX20 21a	55	53,75	0,68	2,18	0,4	0,25	0,15	0,15	0,03	0,002	0,108
TACX20 21b	57	52,33	1,35	3,38	0,55	0,34	0,16	0,2	0,034	0,005	0,079
TACX21 22a	58	53,71	0,73	2,23	0,43	0,25	0,18	0,17	0,029	0,004	0,077
TACX21 22b	59	50,08	1,73	6,64	0,97	0,46	0,2	0,32	0,064	0,007	0,098
TACX22 23a	60	54,28	0,65	1,58	0,21	0,18	0,17	0,11	0,022	0,003	0,029

APÊNDICE 1.1 – Tabela de análises químicas (elementos maiores) do testemunho CSNMA-07-006

continuação

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	CaO (%)	MgO (%)	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	Na2O (%)	K2O (%)	TiO2 (%)	MnO (%)	P2O5 (%)
TACX22 23b	61	53,94	0,84	1,93	0,3	0,23	0,14	0,14	0,026	0,003	0,041
TACX23 24a	62	54,24	0,68	1,57	0,1	0,14	0,14	0,08	0,014	0,003	0,025
TACX23 24b	63	48,59	2,15	6,96	1,41	0,62	0,17	0,46	0,089	0,009	0,085
TACX24 25a	64	17,81	10,32	34,89	4,72	1,93	0,16	1,51	0,23	0,033	0,071
TACX24 25b	65	49,61	1,25	8	1,1	0,7	0,27	0,37	0,074	0,012	0,048
TACX25 26a	66	31,7	4,43	26,98	4	2,28	0,46	1,17	0,252	0,039	0,085
TACX25 26b	67	42,37	2,2	16,26	2,22	1,15	0,37	0,66	0,154	0,021	0,053
TACX26 27a	68	26,68	3,76	32,59	6,48	3,37	0,5	1,67	0,396	0,039	0,097
TACX26 27b	70	30,7	2,66	30,32	4,74	2,02	0,47	1,44	0,277	0,033	0,065
TACX27 28a	71	37,72	2,37	22,67	3,27	2,04	0,43	0,86	0,231	0,04	0,06
TACX27 28b	72	38,78	2,49	20,94	3	1,82	0,42	0,79	0,2	0,031	0,067
TACX28 29a	73	36,07	2,71	23,81	3,35	2,02	0,4	0,92	0,212	0,037	0,056
TACX28 29b	74	36,54	2,33	24,37	3,47	1,76	0,41	1,01	0,219	0,048	0,057
TACX29 30a	75	38,33	2,07	22,13	3,28	1,81	0,42	0,9	0,211	0,039	0,047
TACX29 30b	76	41,54	2,64	17,11	2,03	1,09	0,32	0,62	0,12	0,031	0,04
TACX30 31a	77	41,92	2,45	17,15	2,09	1,13	0,36	0,61	0,126	0,05	0,039
TACX30 31b	78	37,44	3,43	20,17	3,29	1,69	0,48	0,88	0,193	0,036	0,058
TACX31 32a	* 79	5,3	4,8	57,00	11,3	4,00	0,6	2,6	0,6	0,1	0,2
TACX31 32b	80	48,3	1,25	9,39	1,41	0,85	0,31	0,35	0,087	0,03	0,039
TACX32 33a	* 81	17,3	3,2	47,4	8,1	3,6	3,2	1,7	0,4	0,1	0,1
TACX32 33b	82 A	8,46	3,11	59,12	11,44	4,11	0,97	3	0,749	0,071	0,122
TACX32 33b	* 82B	5,6	3,2	58,6	13,9	5,00	0,9	2,9	0,7	<0,01	0,1
TACX32 33b	82 C	48,52	1,19	8,57	1,45	1,05	0,45	0,36	0,096	0,1	0,042
TACX33 34a	83 A	21,88	8,15	29,81	5,9	5,22	0,19	1,49	0,303	0,149	0,092
TACX33 34a	* 83 B	12,4	5,2	45,2	10,5	4,6	0,5	2,3	0,5	0,1	0,1
TACX33 34b	84 A	50,49	1,08	6,36	1,16	0,69	0,43	0,28	0,075	0,077	0,317
TACX33 34b	* 84 B	3,8	3,2	63,4	13,8	3,8	1,00	3,2	0,8	<0,01	0,4
TACX34 35a	85	24,35	8,59	26,7	6,05	3,75	0,3	1,4	0,344	0,123	0,236
TACX34 35b	86	11,37	6,87	40,6	12,69	3,35	0,82	3,34	0,725	0,134	0,218
TACX35 36a	* 87 A	3,8	3,2	63,4	17,5	3,5	1,1	4,4	0,9	<0,01	0,4
TACX35 36a	* 87 B	2,1	5,5	58,3	16,5	4,5	0,6	3,5	0,8	<0,01	0,2
TACX35 36b	88	26,82	14,49	15,28	2,32	1,56	0,15	0,57	0,071	0,216	0,484

* Análise semiquantitativa

APÊNDICE 1.2 – Tabela de análises químicas (elementos-traço e razões elementares) do testemunho CSNMA-07-006

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	CaO (%)	Ca (ppm)	MgO (%)	Mg (ppm)	MnO (%)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Ca/Mg Razão	Mn/Sr Razão
TACX1 01	2	31,48	225017,9	20,87	125874,5	0,013	100,697	139	1,788	0,724
TACX2 03	5A	33,69	240814,9	19,2	115802,2	0,021	162,665	113	2,080	1,440
TACX2 03	5B	52,15	372766,3	3,5	21109,77	0,012	92,951	160	17,658	0,581
TACX3 04	20	46,67	333595,4	8,25	49758,75	0,02	154,919	68	6,704	2,278
TACX4 05	22	55,17	394353,1	0,93	5609,168	0,004	30,984	775	70,305	0,040
TACX6 07	26	54,16	387133,7	1,39	8383,595	0,003	23,238	546	46,178	0,043
TACX7 08	27	50,75	362759,1	4,41	26598,31	0,033	255,616	396	13,638	0,645
TACX8 09	28	52,8	377412,4	2,1	12665,86	0,011	85,205	492	29,798	0,173
TACX9 10	29	51,39	367333,8	3,36	20265,38	0,013	100,697	495	18,126	0,203
TACX10 11	30	53,07	379342,4	1,97	11881,79	0,005	38,730	429	31,926	0,090
TACX11 12a	31	55,63	397641,2	0,28	1688,782	0,002	15,492	932	235,460	0,017
TACX11 12b	32	55,34	395568,3	0,25	1507,841	0,004	30,984	1161	262,341	0,027
TACX12 13a	33	55,15	394210,2	0,29	1749,095	0,002	15,492	1553	225,379	0,010
TACX12 13b	34	55,12	393995,7	0,55	3317,25	0,002	15,492	607	118,772	0,026
TACX13 14a	35	52,77	377198	2,07	12484,92	0,002	15,492	611	30,212	0,025
TACX13 14b	36	51,55	368477,5	2,93	17671,89	0,003	23,238	560	20,851	0,041
TACX14 15a	39	52,24	373409,6	1,56	9408,926	0,004	30,984	1013	39,687	0,031
TACX14 15b	40	53,88	385132,2	0,97	5850,422	0,002	15,492	1029	65,830	0,015
TACX15 16a	45	52,56	375696,9	1,12	6755,127	0,004	30,984	1104	55,617	0,028
TACX15 16b	46	47,97	342887,8	1,96	11821,47	0,009	69,713	1031	29,006	0,068
TACX16 17a	47	52,81	377483,9	0,82	4945,718	0,003	23,238	2030	76,325	0,011
TACX16 17b	48	45,57	325732,7	2,44	14716,53	0,014	108,443	1146	22,134	0,095
TACX17 18a	49	52,03	371908,5	2,56	15440,29	0,004	30,984	702	24,087	0,044
TACX17 18b	50	54,61	390350,3	0,53	3196,622	0,001	7,746	1369	122,113	0,006
TACX18 19a	51	54,37	388634,7	0,67	4041,013	0,001	7,746	2857	96,173	0,003
TACX18 19b	52	53,35	381343,8	0,79	4764,777	0,002	15,492	2294	80,034	0,007
TACX19 20a	53	51,96	371408,1	1,15	6936,068	0,004	30,984	1876	53,547	0,017
TACX19 20b	54	54,79	391636,9	0,52	3136,309	0,002	15,492	1291	124,872	0,012
TACX20 21a	55	53,75	384203	0,68	4101,327	0,002	15,492	1288	93,678	0,012
TACX20 21b	57	52,33	374052,9	1,35	8142,34	0,005	38,730	1765	45,939	0,022
TACX21 22a	58	53,71	383917,1	0,73	4402,895	0,004	30,984	1368	87,197	0,023
TACX21 22b	59	50,08	357970	1,73	10434,26	0,007	54,222	1078	34,307	0,050
TACX22 23a	60	54,28	387991,4	0,65	3920,386	0,003	23,238	1088	98,968	0,021

APÊNDICE 1.2 – Tabela de análises químicas (elementos-traço e razões elementares) do testemunho CSNMA-07-006

continuação

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	CaO (%)	Ca (ppm)	MgO (%)	Mg (ppm)	MnO (%)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Ca/Mg Razão	Mn/Sr Razão
TACX22 23b	61	53,94	385561,1	0,84	5066,345	0,003	23,24	893	76,102	0,026
TACX23 24a	62	54,24	387705,5	0,68	4101,327	0,003	23,24	831	94,532	0,028
TACX23 24b	63	48,59	347319,5	2,15	12967,43	0,009	69,71	796	26,784	0,088
TACX24 25a	64	17,81	127305,2	10,32	62243,67	0,033	255,62	297	2,045	0,861
TACX24 25b	65	49,61	354610,4	1,25	7539,204	0,012	92,95	727	47,036	0,128
TACX25 26a	66	31,7	226590,4	4,43	26718,94	0,039	302,09	311	8,481	0,971
TACX25 26b	67	42,37	302859,2	2,2	13269	0,021	162,66	502	22,825	0,324
TACX26 27a	68	26,68	190707,6	3,76	22677,93	0,039	302,09	297	8,409	1,017
TACX26 27b	70	30,7	219442,5	2,66	16043,43	0,033	255,62	242	13,678	1,056
TACX27 28a	71	37,72	269621,2	2,37	14294,33	0,04	309,84	377	18,862	0,822
TACX27 28b	72	38,78	277198	2,49	15018,09	0,031	240,12	326	18,458	0,737
TACX28 29a	73	36,07	257827	2,71	16344,99	0,037	286,60	266	15,774	1,077
TACX28 29b	74	36,54	261186,6	2,33	14053,08	0,048	371,80	268	18,586	1,387
TACX29 30a	75	38,33	273981,4	2,07	12484,92	0,039	302,09	290	21,945	1,042
TACX29 30b	76	41,54	296926,4	2,64	15922,8	0,031	240,12	280	18,648	0,858
TACX30 31a	77	41,92	299642,6	2,45	14776,84	0,05	387,30	268	20,278	1,445
TACX30 31b	78	37,44	267619,7	3,43	20687,58	0,036	278,85	318	12,936	0,877
TACX31 32b	80	48,3	345246,6	1,25	7539,204	0,03	232,38	439	45,794	0,529
TACX32 33b	82 A	8,46	60471,77	3,11	18757,54	0,071	549,96	137	3,224	4,014
TACX32 33b	82 C	48,52	346819,2	1,19	7177,322	0,1	774,59	374	48,322	2,071
TACX33 34a	83 A	21,88	156397,4	8,15	49155,61	0,149	1154,14	237	3,182	4,870
TACX33 34b	84 A	50,49	360900,6	1,08	6513,872	0,077	596,44	337	55,405	1,770
TACX34 35a	85	24,35	174052,9	8,59	51809,41	0,123	952,75	202	3,359	4,717
TACX34 35b	86	11,37	81272,34	6,87	41435,46	0,134	1037,96	148	1,961	7,013
TACX35 36b	88	26,82	191708,4	14,49	87394,45	0,216	1673,12	156	2,194	10,725

APÊNDICE 1.3 – Tabela de análises mineralógicas por quantificação da difração de raios X, do testemunho CSNMA-07-006

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	Dolomita (%)	Calcita (%)	Quartzo (%)	Micas (%)	Argilom. (%)	Anidrita (%)
TACX1 01	2	74		26			
TACX2 03	5A	60	30	10			
TACX2 03	5B	18	80	2			
TACX3 04	20	71	28				
TACX4 05	22	24	75				
TACX6 07	26	42	58				
TACX7 08	27	33	67				
TACX8 09	28	23	63	14			
TACX9 10	29	37	51	11			
TACX10 11	30	60	32	8			
TACX11 12a	31		100				
TACX11 12b	32		93	7			
TACX12 13a	33		100				
TACX12 13b	34	6	92	2			
TACX13 14a	35	29	57	14			
TACX13 14b	36	26	59	15			
TACX14 15a	39	12	57	24	7		
TACX14 15b	40	10	67	22			
TACX15 16a	45	18	63	19			
TACX15 16b	46	15	50	26	9		
TACX16 17a	47		62	33	4		
TACX16 17b	48	13	47	27	10	3	
TACX17 18a	49	22	66	12			
TACX17 18b	50		72	28			
TACX18 19a	51		80	19			
TACX18 19b	52		79	20			
TACX19 20a	53	11	71	17			
TACX19 20b	54		85	15			
TACX20 21a	55		73	22	4		
TACX20 21b	57	12	40	42			5
TACX21 22a	58		88		12		
TACX21 22b	59	16	50	26	7		
TACX22 23a	60		87	13			

APÊNDICE 1.3 – Tabela de análises mineralógicas por quantificação da difração de raios X, do testemunho CSNMA-07-006

continuação

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	Dolomita (%)	Calcita (%)	Quartzo (%)	Micas (%)	Argilom. (%)	Halita (%)	Pirita (%)	Plagiocl. (%)
TACX22 23b	61		85	15					
TACX23 24a	62	12	62	25					
TACX23 24b	63		45	34	4		17		
TACX24 25a	64	29	10	31	10	2		17	
TACX24 25b	65	12	46	32	9				
TACX25 26a	66	13	26	24	27	9			
TACX25 26b	67	12	40	32	7	8			
TACX26 27a	68	8	30	31	26	5			
TACX26 27b	70	8	33	27	21	11			
TACX27 28a	71	7	33	27	21	11			
TACX27 28b	72		44	38	12	5			
TACX28 29a	73	13	35	31	12	8			
TACX28 29b	74	7	36	30	13	13			
TACX29 30a	75	4	38	33	11	13			
TACX29 30b	76	12	41	35		12			
TACX30 31a	77	13	41	36		10			
TACX30 31b	78	14	39	33		13			
TACX31 32a	* 79	25		36	14	7		18	
TACX31 32b	80		56	32	4	7			
TACX32 33a	* 81	9	29	36	13	12			
TACX32 33b	82 A		27	37	35				
TACX32 33b	* 82B		21	30	13	16		19	
TACX32 33b	82 C		46	42	6	6			
TACX33 34a	83 A	30	26	15	28				
TACX33 34a	* 83 B	21	23	29	27				
TACX33 34b	84 A		53	37	6	4			
TACX33 34b	* 84 B		22	36	14	18			10
TACX34 35a	85	26	25	25	16	7			
TACX34 35b	86	27	8	31	33				
TACX35 36a	* 87 A			44	40				15
TACX35 36a	* 87 B			41	43				15
TACX35 36b	88	29	16	35	19				

* Análise semiquantitativa

APÊNDICE 1.4 – Tabela de análises isotópicas do testemunho CSNMA-07-006

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	δ13C (‰VPDB)	δ18O (‰VPDB)	Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	δ13C (‰VPDB)	δ18O (‰VPDB)
TACX1 01	2	0,81	-4,50	TACX22 23b	61	1,26	-7,64
TACX2 03	5A	-0,80	-7,25	TACX23 24a	62	1,37	-6,96
TACX2 03	5B	0,23	-7,97	TACX23 24b	63	1,36	-7,16
TACX3 04	20	-2,27	-7,39	TACX24 25a	64	2,05	-7,29
TACX4 05	22	-0,10	-7,77	TACX24 25b	65	1,32	-7,06
TACX6 07	26	0,54	-8,58	TACX25 26a	66	1,17	-7,41
TACX7 08	27	-0,33	-8,13	TACX25 26b	67	1,10	-7,91
TACX8 09	28	0,09	-7,77	TACX26 27a	68	0,93	-8,76
TACX9 10	29	0,19	-8,02	TACX26 27b	70	0,82	-8,71
TACX10 11	30	0,63	-8,16	TACX27 28a	71	0,88	-8,56
TACX11 12a	31	0,42	-8,00	TACX27 28b	72	0,83	-8,44
TACX11 12b	32	0,51	-8,32	TACX28 29a	73	0,63	-8,53
TACX12 13a	33	-0,23	-8,44	TACX28 29b	74	0,47	-9,19
TACX12 13b	34	0,59	-7,68	TACX29 30a	75	0,50	-8,93
TACX13 14a	35	0,60	-7,64	TACX29 30b	76	0,49	-9,00
TACX13 14b	36	0,88	-7,85	TACX30 31a	77	0,26	-9,28
TACX14 15a	39	0,91	-7,71	TACX30 31b	78	0,30	-9,68
TACX14 15b	40	0,96	-7,16	TACX31 32a	79	0,05	-8,45
TACX15 16a	45	0,95	-7,35	TACX31 32b	80	-0,27	-11,52
TACX15 16b	46	1,07	-7,36	TACX32 33a	81	-1,55	-11,06
TACX16 17a	47	1,02	-7,18	TACX32 33b	82 A	-1,32	-12,05
TACX16 17b	48	0,82	-7,39	TACX32 33b	82B	-1,75	-12,10
TACX17 18a	49	1,16	-6,65	TACX32 33b	82 C	-1,76	-11,83
TACX17 18b	50	1,10	-7,25	TACX33 34a	83 A	-1,42	-10,83
TACX18 19a	51	1,23	-7,47	TACX33 34a	83 B	-1,57	-11,23
TACX18 19b	52	1,23	-7,22	TACX33 34b	84 A	-1,78	-11,55
TACX19 20a	53	1,35	-7,20	TACX33 34b	84 B	-1,65	-12,27
TACX19 20b	54	1,19	-7,37	TACX34 35a	85	-2,59	-11,59
TACX20 21a	55	1,29	-7,47	TACX34 35b	86	-0,64	-9,33
TACX20 21b	57	1,24	-7,44	TACX35 36a	87 A	SEM CARBONATO	SEM CARBONATO
TACX21 22a	58	1,33	-7,50	TACX35 36a	87 B	SEM CARBONATO	SEM CARBONATO
TACX21 22b	59	1,29	-7,66	TACX35 36b	88	-1,67	-7,74
TACX22 23a	60	1,31	-7,46				

APÊNDICE 2.1 – Tabela de análises químicas (elementos maiores) do testemunho CSNMA-07-001

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	CaO (%)	MgO (%)	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	Na2O (%)	K2O (%)	TiO2 (%)	MnO (%)	P2O5 (%)
TAF1CX1 38A	1	31,51	21,11	0,52	0,09	0,14	0,03	0,05	0,005	0,015	0,006
TAF1CX1 38B	3	31,87	20,89	0,4	0,04	0,11	0,03	0,04	0,005	0,014	0,006
TAF1CX2 39A	7	33,71	19,08	0,68	0,22	0,14	0,04	0,11	0,017	0,012	0,01
TAF1CX3 40A	8	35,6	18,18	0,38	0,01	0,12	0,05	0,02	0,005	0,024	0,009
TAF1CX2 39B	9	31,65	20,98	0,55	0,02	0,15	0,03	0,07	0,011	0,019	0,009
TAF1CX240B	12	31,15	21,86	0,65	<0,01	0,12	0,03	0,02	0,004	0,019	0,011

APÊNDICE 2.2 – Tabela de análises químicas (elementos-traço e razões elementares) do testemunho CSNMA-07-001

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	CaO (%)	Ca (ppm)	MgO (%)	Mg (ppm)	MnO (%)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Ca/Mg Razão	Mn/Sr Razão
TAF1CX1 38A	1	31,51	225232,3	21,11	127322,1	0,015	116,189	143	1,769	0,813
TAF1CX1 38B	3	31,87	227805,6	20,89	125995,2	0,014	108,443	121	1,808	0,896
TAF1CX2 39A	7	33,71	240957,8	19,08	115078,4	0,012	92,951	217	2,094	0,428
TAF1CX3 40A	8	35,6	254467,5	18,18	109650,2	0,024	185,902	183	2,321	1,016
TAF1CX2 39B	9	31,65	226233	20,98	126538	0,019	147,173	258	1,788	0,570
TAF1CX240B	12	31,15	222659	21,86	131845,6	0,019	147,173	89	1,689	1,654

APÊNDICE 2.3 – Tabela de análises mineralógicas por quantificação da difração de raios X, do testemunho CSNMA-07-001

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	Dolomita (%)	Calcita (%)	Quartzo (%)	Micas (%)
TAF1CX1 38A	1	87		13	
TAF1CX1 38B	3	73		16	10
TAF1CX2 39A	7	58	38		4
TAF1CX3 40A	8	55	41	4	
TAF1CX2 39B	9	70	30		
TAF1CX240B	12	73	27		

APÊNDICE 2.4 – Tabela de análises isotópicas do testemunho CSNMA-07-001

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	$\delta^{13}\text{C}$ (‰VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰VPDB)
TAF1CX1 38A	1	1,40	-4,49
TAF1CX1 38B	3	1,65	-7,57
TAF1CX2 39A	7	0,95	-4,12
TAF1CX3 40A	8	-1,30	-6,14
TAF1CX2 39B	9	-0,93	-4,41
TAF1CX240B	12	-1,52	-8,14

APÊNDICE 3.1 – Tabela de análises químicas (elementos maiores) do testemunho CSNMA-07-0016

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	CaO (%)	MgO (%)	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	Na2O (%)	K2O (%)	TiO2 (%)	MnO (%)	P2O5 (%)
TAF16CX2 41A	17	34,14	19,07	0,9	0,06	0,14	0,04	0,09	0,007	0,012	0,007
TAF16CX2 41B	18	34,26	18,36	1,34	0,21	0,13	0,04	0,13	0,012	0,012	0,008
TAF16CX3 42A	19	31,67	21,16	0,67	<0,01	0,13	0,03	0,06	0,008	0,012	0,006
TAF16CX3 42B	21	34,4	19,22	0,44	<0,01	0,09	0,04	0,04	0,007	0,012	0,006

APÊNDICE 3.2 – Tabela de análises químicas (elementos-traço e razões elementares) do testemunho CSNMA-07-0016

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	CaO (%)	Ca (ppm)	MgO (%)	Mg (ppm)	MnO (%)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Ca/Mg Razão	Mn/Sr Razão
TAF16CX2 41A	17	34,14	244031,5	19,07	115018,1	0,012	92,951	180	2,122	0,516
TAF16CX2 41B	18	34,26	244889,2	18,36	110735,8	0,012	92,951	175	2,211	0,531
TAF16CX3 42A	19	31,67	226376	21,16	127623,6	0,012	92,951	135	1,774	0,689
TAF16CX3 42B	21	34,4	245889,9	19,22	115922,8	0,012	92,951	141	2,121	0,659

APÊNDICE 3.3 – Tabela de análises mineralógicas por quantificação da difração de raios X, do testemunho CSNMA-07-0016

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	Dolomita (%)	Calcita (%)	Quartzo (%)
TAF16CX2 41A	17	48	37	15
TAF16CX2 41B	18	48	41	11
TAF16CX3 42A	19	75	21	4
TAF16CX3 42B	21	54	36	10

APÊNDICE 3.4 – Tabela de análises isotópicas do testemunho CSNMA-07-0016

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	$\delta^{13}\text{C}$ (‰VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰VPDB)
TAF16CX2 41A	17	0,95	-4,97
TAF16CX2 41B	18	1,18	-5,11
TAF16CX3 42A	19	1,17	-4,95
TAF16CX3 42B	21	1,17	-4,98

APÊNDICE 4.1 – Tabela de análises químicas (elementos maiores) do testemunho CSNMA-07-0019

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	CaO (%)	MgO (%)	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	Na2O (%)	K2O (%)	TiO2 (%)	MnO (%)	P2O5 (%)
TAF19CX2 43A	4	30,9	20,54	2,68	0,13	0,19	0,03	0,07	0,008	0,019	0,007
TAF19CX2 43B	6	34,39	18,45	1	0,02	0,15	0,04	0,06	0,009	0,019	0,007
TAF19CX3 44A	10	30,41	21,84	1,72	0,07	0,14	0,03	0,08	0,01	0,009	0,007
TAF19CX3 44B	11	31,05	21,96	0,9	<0,01	0,13	0,02	0,04	0,006	0,01	0,006
TAF19CX4 45A	15	36,54	2,33	24,37	3,47	1,76	0,41	1,01	0,219	0,048	0,057
TAF19CX4 45B	16	38,33	2,07	22,13	3,28	1,81	0,42	0,9	0,211	0,039	0,047

APÊNDICE 4.2 – Tabela de análises químicas (elementos-traço e razões elementares) do testemunho CSNMA-07-0019

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	CaO (%)	Ca (ppm)	MgO (%)	Mg (ppm)	MnO (%)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Ca/Mg Razão	Mn/Sr Razão
TAF19CX2 43A	4	30,9	220872,1	20,54	123884,2	0,019	147,173	162	1,783	0,908
TAF19CX2 43B	6	34,39	245818,4	18,45	111278,6	0,019	147,173	168	2,209	0,876
TAF19CX3 44A	10	30,41	217369,5	21,84	131725,0	0,009	69,713	135	1,650	0,516
TAF19CX3 44B	11	31,05	221944,2	21,96	132448,7	0,01	77,459	148	1,676	0,523
TAF19CX4 45A	15	36,54	261186,6	2,33	14053,1	0,048	371,805	268	18,586	1,387
TAF19CX4 45B	16	38,33	273981,4	2,07	12484,9	0,039	302,091	290	21,945	1,042

APÊNDICE 4.3 – Tabela de análises mineralógicas por quantificação da difração de raios X, do testemunho CSNMA-07-0019

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	Dolomita (%)	Calcita (%)	Quartzo (%)
TAF19CX2 43A	4	69		31
TAF19CX2 43B	6	59	31	10
TAF19CX3 44A	10	74		26
TAF19CX3 44B	11	79		21
TAF19CX4 45A	15	49	36	15
TAF19CX4 45B	16	57	32	11

APÊNDICE 4.4 – Tabela de análises isotópicas do testemunho CSNMA-07-0019

Referência de Campo	nº LAMIR 611/10	$\delta^{13}\text{C}$ (‰VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰VPDB)
TAF19CX2 43A	4	0,79	-5,42
TAF19CX2 43B	6	0,45	-5,37
TAF19CX3 44A	10	0,38	-4,42
TAF19CX3 44B	11	0,64	-4,12
TAF19CX4 45A	15	1,05	-4,45
TAF19CX4 45B	16	1,39	-4,87